

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática



Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

TRABAJO FIN DE GRADO

Estimación de carga en actuadores de tipo SMA controlados en posición

Autor: Luis Carlos Sacristán Fernández

Tutor: Alejandro Martín Clemente

Leganés, Madrid
Junio 2013





Título: ESTIMACIÓN DE CARGA EN ACTUADORES DE TIPO SMA CONTROLADOS EN POSICIÓN

Autor: Luis Carlos Sacristán Fernández

Tutor: Alejandro Martín Clemente

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día de Julio de 2013 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

SECRETARIO

VOCAL

PRESIDENTE





Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a toda mi familia por todo el apoyo que he recibido durante mi paso por la universidad y porque me han ayudado en todos los momentos, tanto buenos como malos. En especial, agradecer a mis padres todo lo que han hecho por mí durante todos estos años.

Agradecer a todos mis amigos y compañeros porque gracias a ellos, todo este tiempo que he estado en la universidad ha sido maravilloso.

A mi novia por haberme apoyado y soportado todos estos años y porque ha estado conmigo en todos los momentos.

A mi tutor Alejandro por haberme ayudado a la realización del proyecto, por el buen comportamiento que ha tenido, por compartir sus conocimientos conmigo y por la atención tan extraordinaria que he recibido. Sin duda, un tutor excelente.

A Antonio Flores por todo lo que me ha ayudado en el laboratorio y por tener mucha paciencia conmigo.

A Luis Moreno por ofertarme este proyecto.





Resumen

Los SMAs (Shape Memory Alloys) son materiales un tanto especiales, cuya propiedad más importante es la capacidad de recordar, es decir, poseen memoria. Estos materiales son aleaciones equiatómicas de Níquel y Titanio, que se conocen con el nombre de *hilo de Nitinol*. Presentan una excelente alternativa a los actuadores convencionales, con una fuerza de actuación muy alta, aparte de su acción silenciosa. Gracias a su característica más destacada se pueden pensar multitud de aplicaciones, pero la realidad es que, a pesar de que son conocidos hace décadas, su uso no está muy extendido. Esto se debe a que se desconocen muchos de sus comportamientos ante diversas situaciones y a que el control que se tiene sobre ellos es muy escaso.

Este proyecto pretende aportar un poco más sobre los conocimientos de estos materiales y adentrar al lector en el mundo de los SMAs. Se explicarán algunos de sus comportamientos tan peculiares de una manera fácil y sencilla para que nos hagamos una idea de como son y de todas las aplicaciones en los que se pueden utilizar.

Se pretende hacer una investigación sobre la capacidad que pueden tener estos materiales de estimar carga, ya que poseen una muy buena relación entre el tamaño y la potencia de salida, por ejemplo, un hilo de 0.15 mm de diámetro puede ser capaz de levantar 320 gramos. Para ello, se realizarán diversas pruebas con el fin de ser estudiadas y analizadas para verificar si el SMA puede ser capaz de determinar carga. La idea no es buscar si estos materiales pueden sustituir a una báscula de laboratorio con alta resolución, simplemente evaluar su capacidad de poder medir carga.

En definitiva, se quiere ampliar los conocimientos que la gente tiene sobre estos materiales y, de algún modo, ampliar sus aplicaciones en la industria.





Abstract

Shape Memory Alloys are a kind of special materials, whose most important property is the ability to remember, in other words, they have got memory. These materials are alloys with a 50 % Nickel and 50% Titanium, whose commune name is *Nitinol wire*. They are an excellent alternative to conventional actuators, and have got a high actuation force. Additionally, Nitinol wires are silent when activated. Thanks their most important characteristic, which is the above-mentioned ability, it is possible to imagine them in a lot of application cases. But in reality, even if they are known since several decades, their use is not so much common. The reason of this fact is given by their peculiar behavior in various situations they present, and due to the insufficient control which nowadays it is possible to obtain upon them.

The aim of this project is to contribute a little more to their knowledge and to let the reader understand the SMA's world. Some of their particular behaviors will be explained in a simple and easy manner in order to have an idea about how they are and about all the applications in which they can be used.

The ambition is to carry out a research about the ability these materials can have in the load estimation field, since that they have a high relations between size and out power. For example, a wire with a diameter of 0.15 mm can be able to lift 320 grams. For this reason, various tests will take place in order to study and analyze them verifying the load determination aptitude of the SMAs. It will well explain that the scope of this project is not to obtain evidences upon an alternative use of the SMAs as a high resolution scale, but just to evaluate their possibility to measure loads.

Finally, the will is to enlarge the knowledge that people could have in a future about this materials and, in some ways, to increase their industrial applications.





ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Introducción.....	17
1.2 Motivación.....	18
1.3 Estado del arte.....	19
1.4 Objetivos.....	20
2. ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA.....	21
2.1 Historia de los SMA.....	22
2.2 ¿Qué es un SMA?.....	24
2.3 Características fundamentales de la aleación Níquel-Titanio con memoria de forma.....	25
2.3.1 Principios generales.....	25
2.3.2 Histéresis.....	27
2.3.3 Transformación martensítica termoelástica.....	28
2.3.4 Efecto de la memoria de forma.....	29
2.3.5 Superelasticidad.....	31
2.3.6 Propiedades mecánicas del NiTi.....	33
2.3.7 Propiedades físicas, térmicas y eléctricas del NiTi.....	35
2.4 Memoria de forma de doble sentido.....	37
2.5 Aplicaciones.....	40
3. SOFTWARE UTILIZADO.....	43
3.1 MATLAB.....	44
3.2 SIMULINK.....	46
3.3 Placas de control.....	48
3.4 Keil uVision.....	50
3.5 Esquema general.....	51
4. BANCO DE PRUEBAS.....	52
4.1 Descripción general.....	53



4.2	Sensor magnético de posición	54
5.	ENSAYOS Y ANALISIS	55
5.1	Descripción de los ensayos	56
5.1.1	Objetivos de los ensayos	56
5.1.2	Preparación de la muestra.....	57
5.1.3	¿En qué consisten los ensayos?.....	59
5.2	Tipos de ensayos	61
5.2.1	Ensayo a referencia fija	61
5.2.2	Ensayo de relajación.....	63
6.	EXPERIMENTACIÓN.....	65
6.1	Ensayos preliminares.....	66
6.2	Problemas experimentales.....	69
6.3	Ensayos definitivos	72
6.3.1	Ensayo a referencia fija	73
6.3.2	Ensayo de relajación.....	75
7.	RESULTADOS.....	77
7.1	Ensayo a referencia fija	78
7.2	Ensayo de relajación.....	83
8.	CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS	85
8.1	Conclusiones	86
8.2	Futuros trabajos	87
APÉNDICE A: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CORTEX M3 STM32F103		88
APÉNDICE B: CARACTERÍSTICAS HILO DE NITINOL		89
APÉNDICE C: SCRIPT DE MATLAB (MODELACIÓN)		90
APÉNDICE D: SCRIPT DE MATLAB (VERIFICACIÓN).....		95
BIBLIOGRAFÍA.....		98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Manos robótica creada con SMAs	18
Figura 2: Dispositivo diseñado por la Universidad Carlos III con memoria de forma.	18
Figura 3: Uso de los SMAs en biomedicina.	19
Figura 4: Mariposa animatrónica con hilos de Nitinol.	19
Figura 5: Ejemplo del funcionamiento de un SMA.....	24
Figura 6: Temperaturas críticas de las transiciones de fase.....	25
Figura 7: A) Efecto de superelasticidad. B) efecto de memoria en aleaciones metálicas.	26
Figura 8: Típica transformación para una muestra bajo una carga constante (tensión) a medida que se enfría y se calienta. T1: histéresis de transformación; Ms: inicio de la martensita; Mf: acabado de la martensita; As: inicio austenita; Af: acabado de austenita.....	27
Figura 9: La transformación de la austenita en la fase martensita y el efecto memoria de forma	29
Figura 10: Diagrama ejemplificando el efecto de la memoria de forma.	30
Figura 11: Presentación esquemática de los cambios en la estructura de NiTi causados por el estrés exterior. En acero inoxidable, el estrés externo primero causa cambios de tipo reversible Hookian en la zona elástica. En el área plástica, la deformación tiene lugar a través de un mecanismo llamado deslizamiento (slip). Esta deformación es irreversible. En la superelasticidad, la tensión externa causa un tipo de hermanamiento que se recupera cuando la tensión externa se elimina.	31
Figura 12: Presentación esquemática del comportamiento de tensión-deformación de implantes ordinarios. El material presenta un comportamiento elástico hasta que la tensión se aplica es suficiente para alcanzar la resistencia a la tracción, en cuyo punto se produce una deformación permanente. En la zona de deformación elástica, la relación <i>tensión / deformación</i> determina el módulo elástico. El metal se rompe cuando la tensión excede la resistencia a la tracción.....	33
Figura 13: Esquematación de la curva de Tensión-deformación en función de la fase en materiales con memoria de forma	34
Figura 14: Tres métodos para el entrenamiento de un SMA. [8]	38
Figura 15: Comparación de la memoria simple y memoria doble	39
Figura 16: Estructura tubular llamada “Stent”.	40
Figura 17: Aparato dental hecho con Nitinol.	41
Figura 18: Interfaz de la pantalla principal de MATLAB	44
Figura 19: Parte del Script desarrollado	45
Figura 20: Diagrama de bloques en SIMULINK para el control de los SMAs.....	47



Figura 21: Microcontrolador M3 STM32F103.	48
Figura 22: Interfaz de la pantalla principal de KEIL uVision 4.	50
Figura 23: Banco de pruebas de la Universidad Carlos III de Madrid	53
Figura 24: Imanes del sensor orientados hacia Norte y Sur	54
Figura 25: Sensor magnético de posición.....	54
Figura 26: Fuente de alimentación utilizada.....	57
Figura 27: Pesas utilizadas.	57
Figura 28: Muestra preparada para empezar los ensayos.	58
Figura 29: Interruptores para el control del hilo.....	60
Figura 30: Señal de Control.....	61
Figura 31: Señal de control suavizada con filtro Smooth.....	62
Figura 32: Señal de Posición	63
Figura 33: Señal de la Posición sin outliers.....	63
Figura 34: Curva de bajada del SMA en una de las simulaciones (fase de enfriamiento)	64
Figura 35: Valores medios de las 15 simulaciones para 200 gramos.....	67
Figura 36: Valores medios de las 15 simulaciones para 250 gramos.....	68
Figura 37: Caja de cartón “aislando” el banco de pruebas	70
Figura 38: Señal de control (filtrada) variando la temperatura.	70
Figura 39: Señal de control (filtrada) SIN variar la temperatura.....	70
Figura 40: Modelo definitivo desarrollado en el Script.....	72
Figura 41: Valores medios de la señal de control de las 12 simulaciones para 200 gramos	73
Figura 42: Valores medios de la señal de control de las 12 simulaciones para 230 gramos	74
Figura 43: Valores de las pendientes de la señal de posición de las 12 simulaciones para 200 gramos.....	75
Figura 44: Valores de las pendientes de la señal de posición de las 12 simulaciones para 230 gramos.....	76
Figura 45: Grafica de resultados del ensayo a referencia fija.....	78
Figura 46: Zoom de la gráfica de resultados del ensayo de referencia fija	79
Figura 47: Zoom de la gráfica de resultados del ensayo a referencia fija.	80
Figura 48: Representación gráfica de la desviación máxima frente a los pesos del ensayo a referencia fija.	81
Figura 49: Representación gráfica de los valores medios frente a los pesos del ensayo a referencia fija.	81
Figura 50: Gráfica de resultados de la señal de Posición.	83
Figura 51: Representación gráfica de la desviación máxima frente a los pesos del ensayo de relajación.....	84



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades mecánicas de NiTi	34
Tabla 2: Propiedades físicas del Nitinol	35
Tabla 3: Propiedades Eléctricas y Magnéticas del Nitinol	35
Tabla 4: Propiedades Mecánicas del Nitinol	36
Tabla 5: Propiedades de transformación de Nitinol.	36
Tabla 6: Características principales del hilo de Nitinol.....	57
Tabla 7: Resultados finales para el ensayo a referencia fija.....	74
Tabla 8: Resultados finales para el ensayo de relajación	76
Tabla 9 (APENDICE B): Características principales del Nitinol.....	89





Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN



1.1 Introducción

Las nuevas tecnologías de fabricación han conseguido un abaratamiento de los materiales inteligentes que permiten el desarrollo de nuevas aplicaciones y la sustitución de materiales tradicionales. Este avance está siendo posible gracias al esfuerzo cooperativo de distintos campos de conocimiento, tales como: física de estado sólido, química, ingeniería de materiales, medicina, mecánica, electrónica, etc.

El desarrollo de estos materiales ha hecho posible el ensanchamiento del concepto de diseño estructural hasta tal punto que no solo se contempla la posibilidad de diseñar estructuras que monitoricen su integridad estructural, sino que incluso sean capaces de adaptarse al entorno y poder realizar más aplicaciones tecnológicas en sitios específicos. Estas aplicaciones se pueden encontrar en casi todos los campos, como por ejemplo, industria aeroespacial, biomedicina, ingeniería civil, automoción, etc.

El material inteligente que se va a utilizar en este proyecto son aleaciones metálicas con memoria de forma, los SMAs (Shape Memory Alloys), compuestos por Níquel y Titanio en proporciones iguales. Comúnmente, estos materiales reciben el nombre de Nitinol (NiTi). Estas aleaciones constituyen una parte nueva desde hace algunos años en el ámbito de la investigación ya que poseen varias propiedades que pueden satisfacer bastantes necesidades que hace unos años no se podían ni pensar. Su propiedad más conocida es la memoria.

Unas de las ventajas de este material es que, debido a algunas de sus propiedades, puede sustituir actuadores. Imagínense que, utilizando solo este material, se puede sustituir a muchos de los actuadores de dimensiones mayores por hilos de Nitinol. Se ahorraría espacio y dinero.

En aplicaciones en las que los actuadores no se pueden utilizar, las aleaciones con memoria de forma brindan una excelente alternativa. Hay pocos mecanismos de activación que produzcan un trabajo más útil por unidad de volumen que el Nitinol.

El fin de esta introducción es que gracias a estos materiales inteligentes, como es el hilo de Nitinol, se pueda acceder a sitios complicados (debido a su fino diámetro) y se puedan realizar tareas en las que sustituya a otros elementos electrónicos comunes, como por ejemplo, actuadores convencionales.

1.2 Motivación

En el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid se realizan numerosos proyectos e investigaciones orientados al campo de la automática y el control. Esto da lugar a que se investigue más a fondo y con nuevas tecnologías como son los materiales con memoria de forma, los SMAs. Estos materiales permiten desarrollar nuevos sistemas de control más eficientes, económicos y específicos con los que poder trabajar. Permiten el ahorro de espacio y dinero.

Estos materiales están en procesos de investigación constantes ya que para nuestra sociedad son casi “nuevos”. Su uso no es muy extendido pero sus propiedades hacen pensar en muchas aplicaciones futuras, sobre todo en el campo de la robótica, de la biomedicina y la militar.

Respecto al campo de la robótica este material puede mejorar la precisión de los robots. En concreto, han creado con estos materiales una garra para un robot capaz de asir objetos con una precisión de micras. Véase figura 1.

También se utilizan estos materiales para fabricar piezas que sirvan a la NASA, como por ejemplo un limpiaparabrisas que limpie el polvo marciano de los sensores de las naves de la NASA que vuelan al planeta rojo. La característica principal es que es muy ligero pero puede levantar mucho peso. Véase figura 2.

Viendo los distintos usos que se hacen de estos materiales y sus posibilidades en el futuro, se hace muy interesante el estudio sobre ellos.



Figura 1: Manos robótica creada con SMAs



Figura 2: Dispositivo diseñado por la Universidad Carlos III con memoria de forma.

1.3 Estado del arte

El Nitinol se está utilizando en una gran variedad de aplicaciones, pero la mayoría de ellas están en procesos de investigación. Se están utilizando para aplicaciones militares, médicas, de seguridad, y robótica. Los militares han estado usando acopladores de Nitinol en los aviones de combate F-14 desde finales de 1960. Estos acopladores unen las líneas hidráulicas con fuerza y facilidad.

Muchas de las aplicaciones actuales de Nitinol están en el campo de la medicina y la robótica. En cuanto al campo de la medicina, podemos encontrar estos materiales como pinzas para extraer objetos extraños a través de pequeñas incisiones, ganchos para sujetar los tendones a los huesos (utilizados para la cirugía de hombro Orel Hershisser) y alambres de ortodoncia (reduce la necesidad de volver a apretar y ajustar el alambre). En el campo de la robótica también se pueden encontrar diversas aplicaciones, como por ejemplo una mano robótica. Un factor que lo hace más interesante es la baja conductividad eléctrica a pesar de ser una aleación de metal.

En el campo de la construcción también se pueden ver estos materiales, como por ejemplo para evitar el desprendimiento de paredes o la separación de los diferentes tramos de un puente.

El interés por los materiales con memoria de forma ha ido incrementando en los últimos años. En la actualidad, las aleaciones de NiTi se emplean con éxito en aplicaciones industriales sustituyendo a los actuadores convencionales.

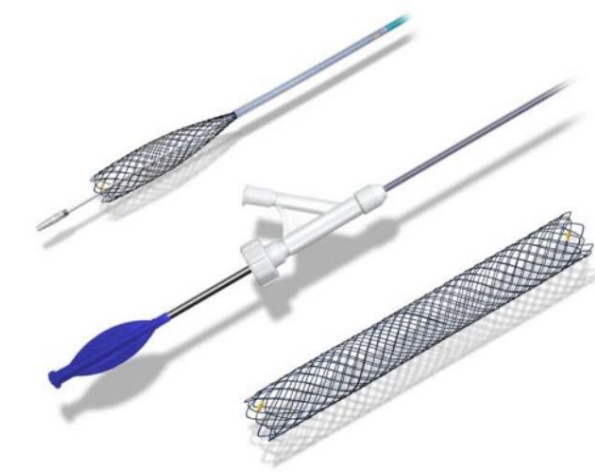


Figura 3: Uso de los SMAs en biomedicina.



Figura 4: Mariposa animatrónica con hilos de Nitinol.



1.4 Objetivos

Hay dos objetivos **principales** en este proyecto, que son:

- Estimación de carga mediante un actuador de tipo SMA a partir de su señal de control PWM y de su señal de posición, **SIN** ningún tipo de sensor.
- El error que se cometa no debe superar el 10%.

Como objetivo secundario, se espera aprender más sobre las características más comunes y adquirir nuevos conocimientos sobre estos materiales.



Capítulo 2

2. ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA



En este capítulo se explicará un poco que son los SMA's, su historia, y todas las características que poseen.

El término aleaciones de memoria de forma (SMA) se aplica a ese grupo de materiales metálicos que demuestran la capacidad de volver a alguna forma o tamaño definido previamente, cuando se somete al procedimiento térmico adecuado. Son un tipo de aleaciones metálicas que tienen la principal habilidad de recordar, de “*tener memoria*”. Generalmente, estos materiales pueden ser deformados plásticamente en una cierta temperatura relativamente baja, y tras la exposición a una cierta temperatura superior, volverían a su forma anterior a la deformación. Los materiales que presentan esta característica de la memoria de forma, sólo después del calentamiento, se conocen como que tiene una memoria de forma unidireccional. Algunos materiales también se someten a un cambio en la forma en refrigeración de retorno. Estos materiales tienen una memoria de forma bidireccional.

2.1 Historia de los SMA

Los primeros indicios hacia el descubrimiento del efecto de memoria de forma se vieron en el año 1930 de acuerdo. La primera observación del fenómeno de memoria de forma tuvo lugar en 1932 por parte del sueco Arne Ölander. Éste descubrió un comportamiento pseudoelástico al trabajar con una aleación Au-Cd. En 1938, Greninger y Mooradian observaron la formación y desaparición de una fase martensítica mediante la disminución y el aumento de la temperatura de una aleación de Cu-Zn [1]. Sin embargo, no fue hasta 1962, cuando Buehler y sus colaboradores descubrieron el efecto en níquel-titanio (NiTi), que fue cuando la investigación tanto en la metalurgia como en los posibles usos prácticos comenzó en serio. El estudio de las aleaciones con memoria de forma ha continuado a un ritmo creciente desde entonces, y más productos que utilicen estos materiales están llegando al mercado cada año [2], [3].

Como el efecto de memoria de forma se ha entendido mejor, un número de otros sistemas de aleación con memoria de forma fueron investigados. Las aleaciones de NiTi (níquel-titanio) y algunas de las aleaciones a base de cobre han recibido el mayor esfuerzo de desarrollo y explotación comercial. Estos serán el foco de la balanza de este proyecto.

Las Aleaciones de níquel-titanio se han encontrado para ser lo más útil de los SMAs. El nombre genérico de la familia de aleaciones de níquel-titanio es **Nitinol**. Las aleaciones de Níquel-Titanio se desarrollaron por primera vez en 1962-1963 por el Laboratorio de Artillería Naval de los Estados Unidos y comercializado bajo el nombre comercial de **Nitinol** (cuyo acrónimo es Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory).



En esta fecha fue cuando se descubrió que estos materiales poseen la propiedad única de tener memoria de forma. William J. Buehler, investigador en el Laboratorio de Artillería Naval en White Oak, Maryland, fue el que descubrió esta aleación con memoria de forma. El descubrimiento real de la propiedad de memoria de forma del Nitinol se produjo por accidente. En una reunión de la dirección del laboratorio, una franja de Nitinol que se presentó fue doblada en forma muchas veces. Uno de los presentes, el Dr. David S. Muzzey, lo calentó con su propio encendedor, y sorprendentemente, la tira se remontaba a su forma original.

En la década de 1980 la idea alcanzo un mayor apoyo, y algunas aplicaciones en la ortodoncia y en el área de ortopédica experimental, fueran realizadas. Fue sólo hasta mediados de la década de 1990, sin embargo, que las primeras aplicaciones de los stents comerciales hicieron su aparición en la medicina.

Además de las aleaciones NiTi que se estudian en este proyecto, existen otras aleaciones que también presentan la propiedad de memoria de forma, como por ejemplo: Fe-Pt, Fe-Ni-C, FeNi-Nb, Fe-Cr-Ni-Mn, Cu-Zn, Cu-Al, Cu-Zn-Al.

Los SMAs, como se ha dicho anteriormente, no son los únicos materiales que poseen la propiedad de memoria de forma. Estos se encuentran dentro de un grupo llamado "*Materiales con Memoria de Forma*". Existen cuatro tipos de materiales: SMPs, SMCs, SMAs y FMSAs; cuyas diferencias radican en su forma de activación y en los rangos de sus propiedades.

- Aleaciones metálicas con memoria de forma (SMAs)
- Aleaciones metálicas con memoria de forma inducida magnéticamente (FSMAs)
- Cerámicas con memoria de forma (SMCs)
- Polímeros con memoria de forma (SMPs).

En su funcionamiento, cabe destacar que estos materiales no deben de ser sobrecalentados, ya que si no se perderían las capacidades de recuperación de las que dispone. Tampoco se debe estirar más de un 3-5 % de su longitud, aunque el Nitinol puede alcanzar hasta el 10%, ya que podrían romperse. La fuerza máxima a la que deberían someterse para un buen funcionamiento, debería de ser menor que un tercio de su máxima fuerza de recuperación.

2.2 ¿Qué es un SMA?

Una aleación con memoria de forma (SMA, metal inteligente, metal con memoria, cable muscular, aleación inteligente) es una aleación que "recuerda" su forma original, es decir, la aleación es capaz de volver a la forma predeformada cuando se calienta. Este material es de peso ligero, de estado sólido, que sirve de alternativa a los actuadores convencionales tales como sistemas hidráulicos, neumáticos, motor y actuadores. Veamos algunos ejemplos para comprender un poco mejor estos materiales.

Unos de los ejemplos más prácticos y que mejor se puede asimilar al comportamiento del hilo de NiTi es un *material de goma* cualquiera. Pero este material de goma está "pasado", seco, y cuando le aplicamos una fuerza externa y deformamos el material, este se queda deformado sin volver a su posición inicial. Entonces, en cuanto lo calentamos, el material volvería a la forma que tenía antes de aplicarle la fuerza. Según le suministremos la energía (el calor) tardará más o menos en recuperar su forma inicial.

Como he mencionado al principio de este apartado, un SMA también puede llamarse como *cable muscular*. Un SMA puede mejorar el tratamiento de los huesos rotos. Cuando los médicos reconstruyen piernas y brazos destrozados, suelen utilizar cables de acero inoxidable para mantener los huesos unidos. Pero el acero no siempre mantiene su forma y los huesos pueden moverse y curarse mal. Sin embargo, si utilizamos hilos de NiTi, la posición de los huesos se mantiene mucho mejor. El truco es enfriar el NiTi y luego estirarlo antes de envolverlo alrededor de la sección dañada. Después de seis meses, aproximadamente, se calienta de nuevo e intenta volver a su forma original ejerciendo una fuerza constante. De esta forma, el NiTi es capaz de hacer frente a los movimientos de los huesos y la curación será mucho más rápida [4].

Esto es una pequeña pincelada a los SMAs. En los siguientes apartados nos adentraremos un poco más en estos materiales.

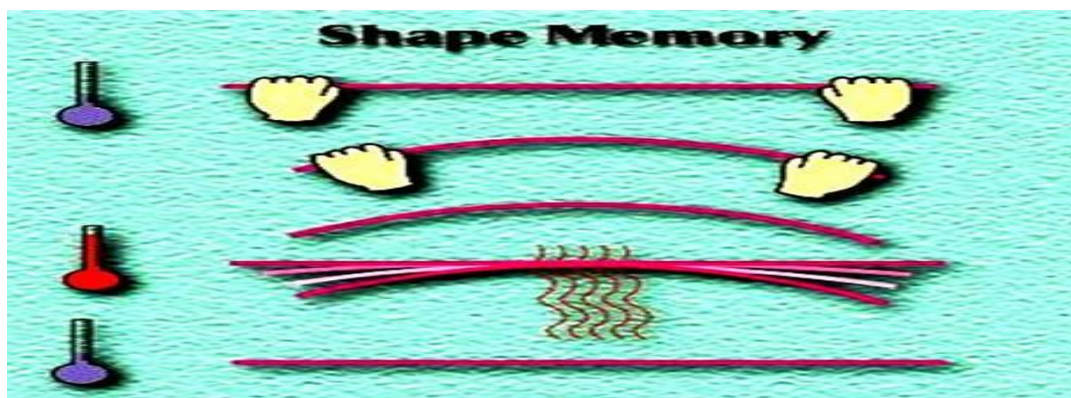


Figura 5: Ejemplo del funcionamiento de un SMA

2.3 Características fundamentales de la aleación Níquel-Titanio con memoria de forma

Los materiales con memoria de forma, como ya se ha comentado, son un tipo de aleaciones metálicas que tienen la especial habilidad de recordar o de retener una específica forma o tamaño anterior a su deformación, sometándose a un proceso de calentamiento. Estos materiales demuestran esta habilidad mediante el proceso de transformación de fase dependiente de la temperatura, entre dos estructuras cristalinas. La fase de temperatura más alta es conocida como austenita y la de menor temperatura como martensita [5]. Este fenómeno es conocido como “*efecto memoria*”.

2.3.1 Principios generales

La forma de NiTi puede existir en dos estructuras cristalinas diferentes, dependientes de la temperatura de fase. Estas dos estructuras son llamadas martensita (menor temperatura) y austenita (fase de mayor temperatura). Las propiedades de la fase de austenita y martensita de NiTi son notablemente diferentes.

De este modo, el origen del efecto de memoria de forma se basa en la presencia de diferentes estructuras internas a diferentes temperaturas. Las temperaturas críticas a las cuales tienen lugar las transiciones de fase se identifican como:

- **Ms** (temperatura de inicio de la formación de la martensita).
- **Mf** (temperatura final de la formación de la martensita).
- **As** (temperatura de inicio de la formación de la fase austenita).
- **Af** (temperatura a la que se completa la formación de la fase austenita).

Véase figura 6.

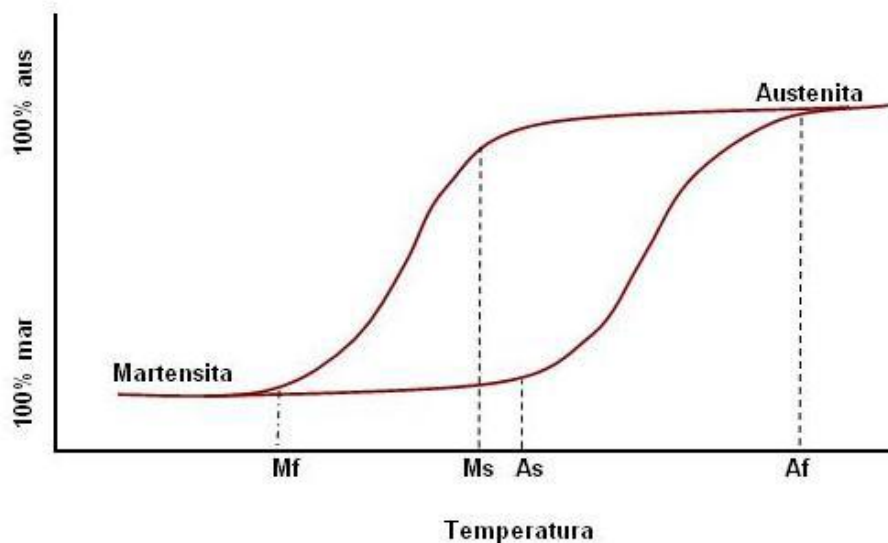


Figura 6: Temperaturas críticas de las transiciones de fase.

Desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas, NiTi puede tener tres formas diferentes: martensita, martensita inducida por tensión (superelasticidad), y austenita. Cuando el material está en su forma martensita, que es blando y dúctil, puede ser fácilmente deformada. En la forma de superelasticidad es altamente elástico (parecido a la goma), mientras en la austenita es bastante fuerte y duro (similar al titanio).

El efecto de superelasticidad involucra una transformación martensítica inducida por una deformación externa, es decir, el material es deformado a una temperatura superior a la temperatura de la fase austenita, de forma que se induce al mismo tiempo una transformación martensítica. Dado que esta transformación se ha generado a otra temperatura distinta a la habitual, al cesar la tensión que genera la deformación, el material recupera inmediatamente la fase no deformada austenita, demostrando una capacidad elástica fuera de lo común.

En resumen, por un lado, el efecto de memoria de forma consiste en el fenómeno por el cual una muestra deformada cuando se encuentra en fase martensita recupera su forma original como consecuencia del proceso de transformación inversa que se produce al calentar el material y evolucionar hacia la forma austenita. Sin embargo, por otro lado, el efecto de superelasticidad se produce cuando la aleación es deformada en fase austenita, formándose una fase martensita provisional (inestable), y recupera su dimensión original (fase austenita) al cesar la tensión externa [6] .

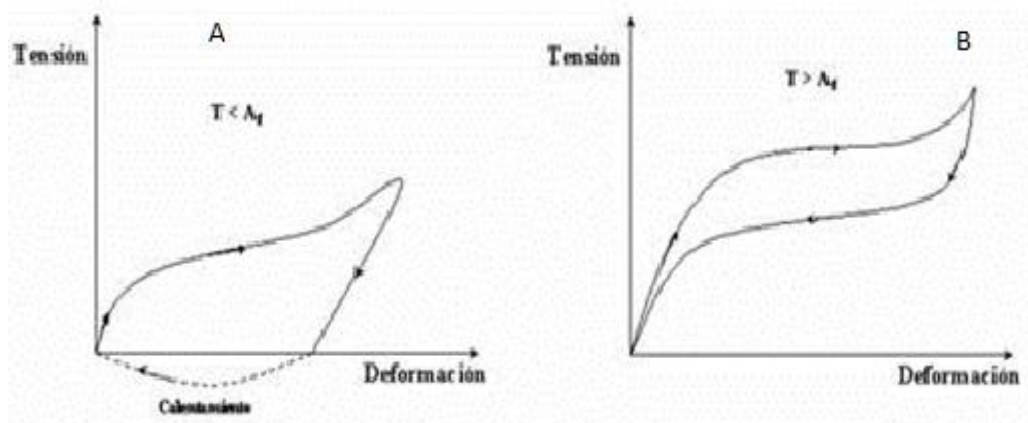


Figura 7: A) Efecto de superelasticidad. B) efecto de memoria en aleaciones metálicas.

2.3.2 Histéresis

El rango de temperatura para la transformación de martensita a austenita tiene lugar tras el calentamiento que es algo mayor que el de la transformación inversa en el enfriamiento. La diferencia entre las temperaturas de transición tras la calefacción y la refrigeración se llama histéresis, véase figura 8. La histéresis se define en general como la diferencia entre las temperaturas a las que está 50% del material transformado en austenita con el calentamiento y el 50% transformado en martensita durante el enfriamiento [7]. Esta diferencia puede ser de hasta 20-30 ° C. En la práctica, esto significa que una aleación diseñada para ser completamente transformada por la temperatura del cuerpo después del calentamiento ($A_f < 37\text{ ° C}$) requeriría de enfriar a alrededor de +5 ° C para transformarse completamente en martensita (M_f).

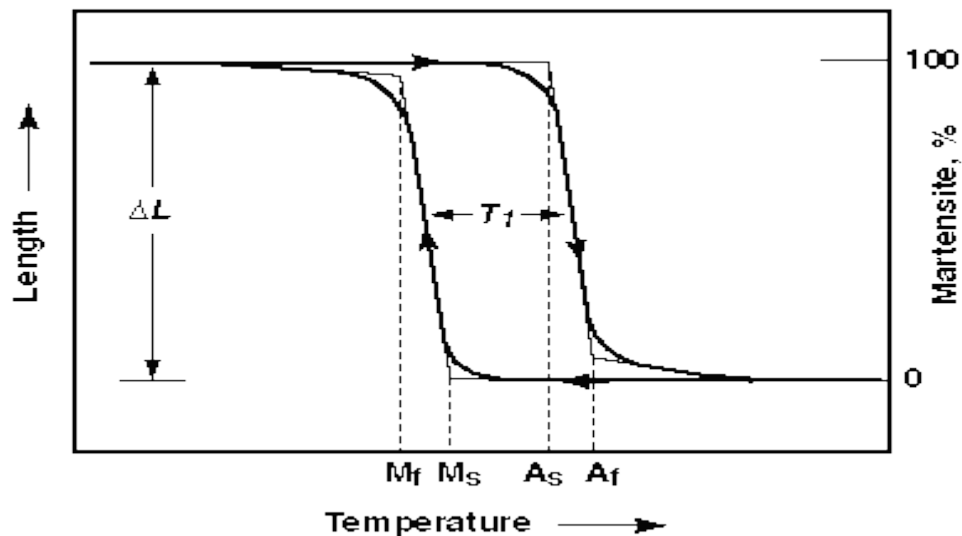


Figura 8: Típica transformación para una muestra bajo una carga constante (tensión) a medida que se enfría y se calienta. T_1 : histéresis de transformación; M_s : inicio de la martensita; M_f : acabado de la martensita; A_s : inicio austenita; A_f : acabado de austenita.



2.3.3 Transformación martensítica termoelástica

El comportamiento único de NiTi se basa en la transformación de fase dependiente, de la temperatura de la austenita a martensita en una escala atómica, que también se denomina transformación martensítica termoelástica. La transformación martensítica termoelástica es la causante de la recuperación de la forma, debido a que es un resultado de la necesidad de la estructura de red cristalina para acomodar al estado de energía mínima para una temperatura dada [1]. En NiTi, las simetrías relativas entre las dos fases conducen a una transformación altamente ordenada, donde los desplazamientos de los átomos individuales se pueden predecir con exactitud y, eventualmente, conducen a un cambio de forma en una escala macroscópica.

Aunque la mayoría de los metales se deforman por deslizamiento o dislocación, NiTi responde al estrés, simplemente cambiando la orientación de su estructura cristalina a través del movimiento de las fronteras gemelas.

Una muestra de NiTi se deformará hasta que se produzca la deformación máxima. Sin embargo, la deformación, más allá de esto, dará lugar a una deformación plástica clásica por deslizamiento, que es irrecuperable y por lo tanto no tiene ningún "efecto de memoria". Si la deformación se detiene a mitad de camino, la muestra contendrá varias variantes de diferentes correspondencias. La estructura del cristal austenítico es una estructura cúbica simple, mientras que la martensítica tiene una estructura rómbica más compleja. Este fenómeno hace que la muestra se pueda revertir completamente a la forma que tenía antes de la deformación.

El fenómeno anterior es la base de estas propiedades especiales como el efecto memoria de forma y superelasticidad.

2.3.4 Efecto de la memoria de forma

Las aleaciones con memoria de forma presentan un comportamiento completamente distinto al de los materiales usuales. Por ejemplo, mientras que se considera que la gran mayoría de los metales comienzan a deformarse plásticamente a partir de un 0.2% de elongación cuando son sometidos a un ensayo de tensión, las aleaciones con memoria de forma pueden deformarse hasta un 10% sin llegar a su plasticidad. Una aleación metálica posee memoria de forma sí después de una deformación permanente a baja temperatura, esta recupera su forma inicial con un simple calentamiento.

SMA constituye un grupo de piezas metálicas con la capacidad de recuperar una longitud o forma anterior cuando se encuentra bajo un proceso termodinámico. La transición desde una forma de estructura cristalina a otra crea un mecanismo por el cual se produce el cambio de forma en los SMAs. Este cambio implica la transición de una forma de cristal monoclinico (martensita) a una forma cristalina ordenada cúbica (austenita). La fase austenítica es estable a alta temperatura, y el martensita es estable a temperaturas más bajas. Así, la fase transformación entre las dos fases, martensita y austenita, se acompaña de variaciones en su resistividad [1], véase figura 9C.

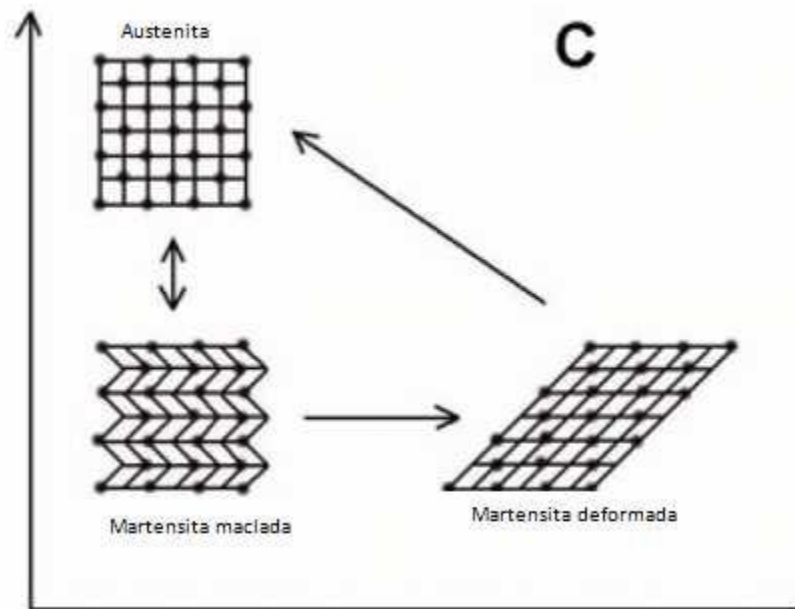


Figura 9: La transformación de la austenita en la fase martensita y el efecto memoria de forma.

Considérese, por ejemplo, una tira de la aleación níquel-titanio en fase austenítica (A) a la temperatura T_1 , véase figura 10.a. Mediante enfriamiento rápido se lleva la muestra a su fase martensítica (M) y se tendrá lo mostrado en la figura 10.b, en la que la tira tendrá la misma forma geométrica pero estará en una fase distinta (martensítica) y a temperatura T_2 . Si en esta fase y a la temperatura T_2 se aplica un esfuerzo creciente, la plaqueta se deformará en dos etapas: primero de manera elástica, para continuar deformándose por reorientación de granos de diferente orientación cristalográfica (Figura 10.c); la segunda etapa es la mostrada en la figura 10.d. En esta segunda etapa se llegan a obtener deformaciones hasta de un 10% sin que se inicie la deformación plástica del material. Al retirar el esfuerzo la muestra se encuentra en las condiciones siguientes: en fase martensítica, deformada en relación con su forma original, sin esfuerzo externo y a temperatura T_2 . Si ahora se eleva la temperatura de T_2 a T_1 , lo que ocurre es que la tira regresa a su fase austenítica (A) y recupera su forma original (figura 10.e). Dicho de otra manera, el material recuerda la fase y forma que tenía a la temperatura T_1 , y de aquí el nombre de fenómeno de "memoria de forma".

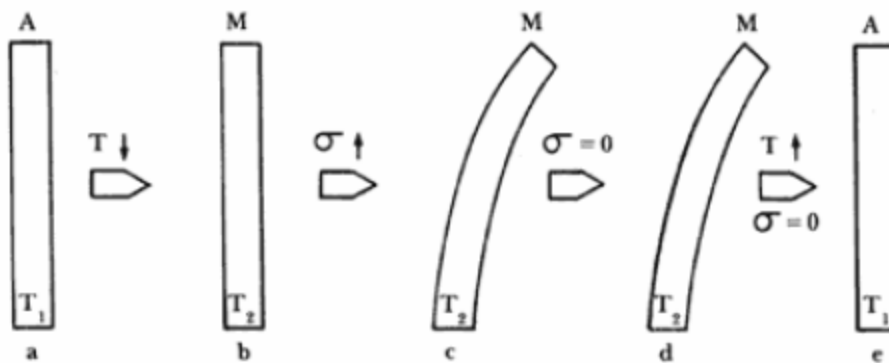


Figura 10: Diagrama ejemplificando el efecto de la memoria de forma.

Debido a ventajas tales como la reducción del tamaño de la aplicación, de alto poder potencia-peso y de sistemas de accionamiento silencioso, estos materiales se utilizan como actuadores en muchos tipos de robots [2]. Las desventajas de estos materiales pueden ser citados a la propiedad de histéresis. A pesar de estas limitaciones, se utilizan mucho en manos robóticas y biomateriales [3].

En definitiva, un cambio en la temperatura ambiente, es capaz de convertir su forma a una estructura reprogramada.

2.3.5 Superelasticidad

La superelasticidad se refiere a la capacidad de NiTi para volver a su forma original después de la descarga de una deformación sustancial. Esto se basa en la formación de martensita inducida por tensión. La deformación macroscópica es acomodada por la formación de martensita. Cuando la tensión se libera, la martensita se transforma de nuevo en austenita y la muestra vuelve a su forma original (Figura 5). El NiTi puede estirarse varias veces más que las aleaciones de metales comunes sin ser deformado plásticamente, ya que refleja su comportamiento similar al del caucho.

La formación de la martensita es un proceso termoelástico, es decir, cuando bajamos la temperatura se forman nuevas placas de martensita. Si no hay ninguna carga aplicada, la formación de martensita empieza a una temperatura llamada M_s . Pero, si aplicamos una tensión, la martensita empieza a formarse antes de la M_s (M_d , Temperatura máxima de formación de la martensita inducida), y esta martensita se llama martensita inducida por tensión. El efecto de superelasticidad puede ocurrir en un rango de temperatura entre A_f y M_d .

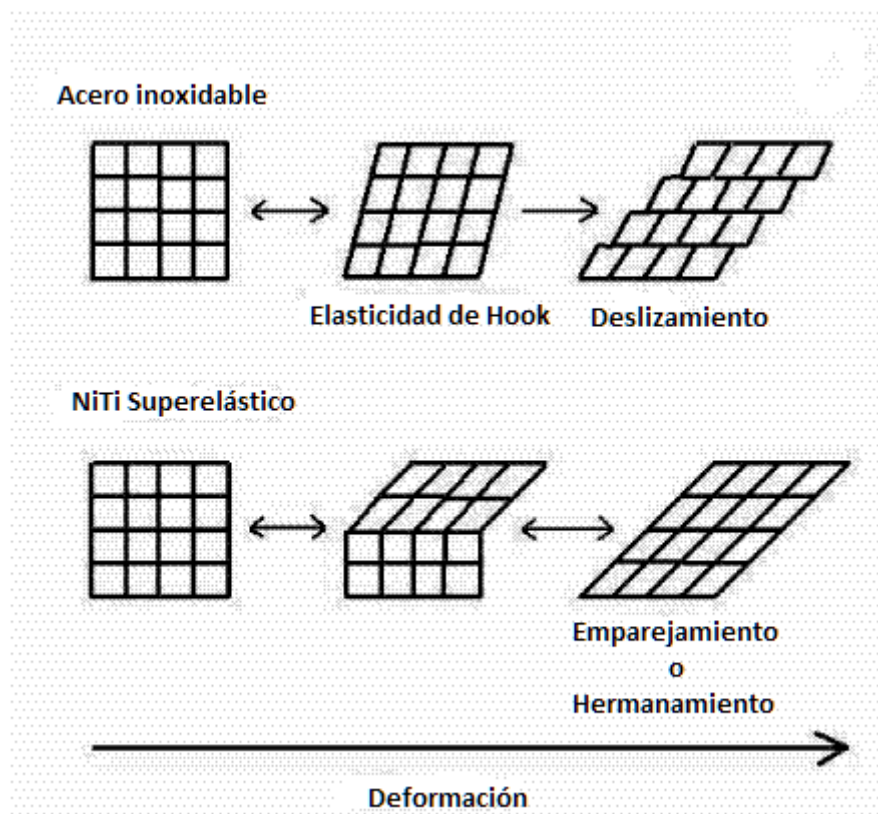


Figura 11: Presentación esquemática de los cambios en la estructura de NiTi causados por el estrés exterior. En acero inoxidable, el estrés externo primero causa cambios de tipo reversible Hookian en la zona elástica. En el área plástica, la deformación tiene lugar a través de un mecanismo llamado deslizamiento (slip). Esta deformación es irreversible. En la superelasticidad, la tensión externa causa un tipo de hermanamiento que se recupera cuando la tensión externa se elimina.



-Limitaciones para el comportamiento superelástico de las aleaciones con memoria de forma

Alrededor del 8% de deformación puede ser recuperado por el calentamiento o por retirar la descarga. Deformar por encima del valor límite se mantendrá como una deformación plástica permanente. La temperatura de funcionamiento para los dispositivos de memoria de forma no debe moverse significativamente lejos del rango de transformación, o en consecuencia las características de la memoria de forma pueden ser alteradas. Un implante de NiTi con memoria de forma debe ser deformado a una temperatura inferior a la temperatura A_s (que por lo general es menor a 5 °C). Por otra parte, el límite de deformación determinada por el diseño distintivo del implante (ángulos, espesores, etc.) y la tolerancia intrínseca del material NiTi a la carga, no deben ser pasados por alto.

2.3.6 Propiedades mecánicas del NiTi

En general, para casi todas las aplicaciones del NiTi, sobre todo para biomateriales ortopédicos, las dos propiedades de mayor importancia son la resistencia (mecánica) y reactividad (química). Las tensiones de servicio deben ser de forma segura, estando por debajo del límite de elasticidad del material, y en las cargas cíclicas de la tensión de servicio, debe mantenerse por debajo del límite de fatiga. Véase Figura 12.

Las propiedades mecánicas de NiTi dependen de su estado de fase a una cierta temperatura. Cuando el Niti es completamente austenítico, generalmente, tiene propiedades adecuadas para la implantación quirúrgica. Las propiedades mecánicas de la aleación NiTi se presentan en la Tabla 1. Hay algunas propiedades excepcionales que pueden ser útiles en la cirugía. NiTi tiene una capacidad de ser altamente amortiguado de vibraciones y de atenuación por debajo de la temperatura A_s . Desde el punto de vista ortopédico, esta propiedad podría ser útil en, por ejemplo, la amortiguación de la tensión pico entre el hueso y la prótesis articular. El bajo módulo elástico de NiTi (que está mucho más cerca del módulo de hueso elástico que la de cualquier otro implante de metal) podría proporcionar beneficios en aplicaciones específicas. Tiene propiedades de alta fatiga y dúctil, que también están relacionadas con la transformación martensítica. Estas propiedades son por lo general favorable en implantes ortopédicos.

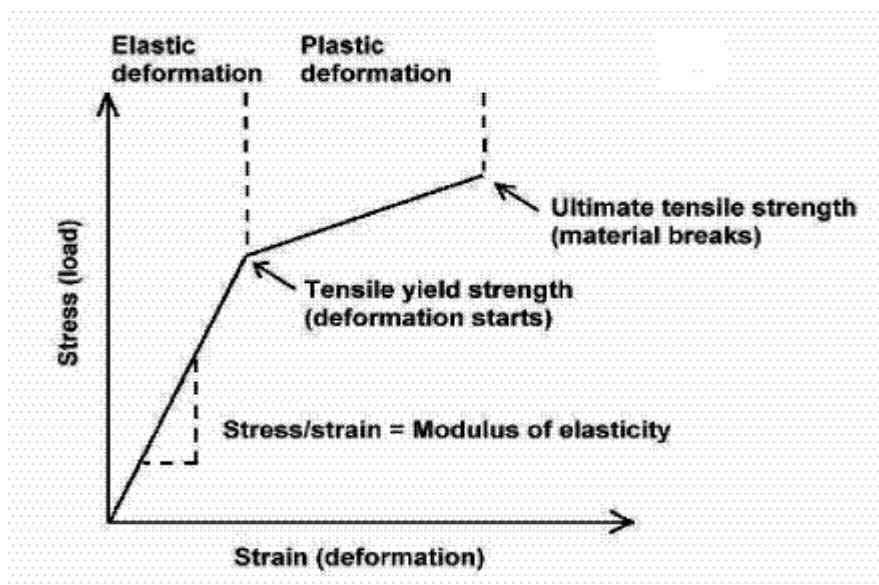


Figura 12: Presentación esquemática del comportamiento de tensión-deformación de implantes ordinarios. El material presenta un comportamiento elástico hasta que la tensión se aplica es suficiente para alcanzar la resistencia a la tracción, en cuyo punto se produce una deformación permanente. En la zona de deformación elástica, la relación *tensión / deformación* determina el módulo elástico. El metal se rompe cuando la tensión excede la resistencia a la tracción.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de NiTi.

PROPIEDADES		
	Austenita	Martensita
Módulo elástico (GPa)	70-110	21-69
Resistencia a la tracción (MPa)	800-1500	103-1100
Alargamiento (%)	1-20	Hasta 60
Límite elástico (GPa)	70-110	21-69

Más adelante veremos otra tabla más completa sobre las propiedades mecánicas del NiTi.

Las aleaciones con memoria de forma NiTi tienen un comportamiento mecánico distinto en función de la fase (como se indica en la figura 13).

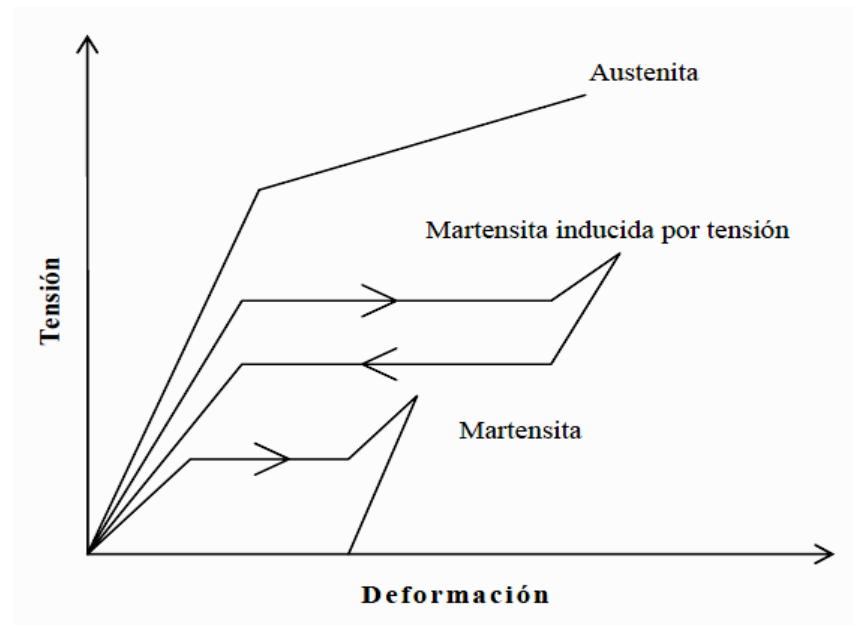


Figura 13: Esquematización de la curva de Tensión-deformación en función de la fase en materiales con memoria de forma.

La austenita es la fase más dura y resistente, mientras que la fase martensítica es fácilmente deformable y más blanda, siempre y cuando no contengan precipitados que podrían incluso invertir este comportamiento.



2.3.7 Propiedades físicas, térmicas y eléctricas del NiTi

Es importante presentar las principales características que posee el Nitinol por dentro, con el fin de poder hacer una buena aplicación del mismo. A continuación se indicaran las propiedades tanto físicas como térmicas y eléctricas del Nitinol en las tablas 2, 3, 4 y 5.

Tabla 2: Propiedades físicas del Nitinol.

PROPIEDAD	VALOR
Punto de fusión	1300 Co (2370 °F)
Densidad a temperatura ambiente	6.45 g/cm ³ (0.233 lb/pulg ³)
Conductividad térmica:	
Austenita	0.18 W/cm * °C (10.4 BTU/ft * h * °F)
Martensita	0.086 W/cm * °C (5.0 BTU/ft * h * °F)
Coefficiente de expansión térmica:	
Austenita	11.0E-6/ °C (6.116/ °F)
Martensita	6.6E-6/ °C (3.67E6/ °F)
Calor específico	0,20 cal/g * °C (0,20 BTU/lb * °F)
Resistencia a la corrosión	Excelente*

*Similares a los del acero inoxidable serie 300 o titanio.

Tabla 3: Propiedades Eléctricas y Magnéticas del Nitinol.

PROPIEDAD	VALOR
Resistividad de conductor: [resistencia=resistividad*longitud/área transversal]	
Austenita	aprox. 100 micro-ohmios * cm (39 micro-ohmios * Pulgada).
Martensita	aprox. 80 micro-ohmios * cm (32 micro-ohmios * Pulgada).
Permeabilidad magnética	< 1.002
Susceptibilidad magnética	3 .0E6 emu/g



Tabla 4: Propiedades Mecánicas del Nitinol.

PROPIEDAD	VALOR
Módulo de Young: (altamente no lineal con respecto a la temperatura)	
Austenita	aprox. 83 GPa (12E6 psi)
Martensita	aprox. 28 a 41 GPa (de 4E6 a 6E6 psi)
Resistencia a la fluencia:	
Austenita	195 a 690 MPa (28 a 100 ksi)
Martensita	70 a 140 MPa (10 a 20 ksi)
Resistencia a la tensión máxima :	
Completamente endurecido	895 MPa (130 ksi)
Endurecido por trabajo	1900 MPa (275 ksi)
Relación de Poisson	0.33
Elongación hasta la falla:	
Completamente endurecido	25 y el 50 %
Endurecido por trabajo	5 a 10 %
Deformable en caliente	Bastante bueno.
Deformable en frío	Difícil debido al endurecimiento rápido por trabajo.
Maquinabilidad	Técnicas difíciles, abrasivas preferentemente.

Tabla 5: Propiedades de transformación de Nitinol.

PROPIEDAD	VALOR
Calor latente de transformación	5,78 cal/g
Transformación de tensión (para material policristalino):	
Para un ciclo	Máx. 8 %
Para 100 ciclos	6%
Para 100.000 ciclos	4%
Histéresis	30 a 50 °C *
Temperatura de transformación	-200 a 110 °C

*Los valores enumerados son para una plena martensita a la transición de austenita.

2.4 Memoria de forma de doble sentido

Existe la posibilidad de que el SMA recuerde dos formas, en vez de una solo. Para lograr esto es necesario entrenamiento ya que la base de esta memoria de doble sentido es la creación de tensiones internas en el material. Existen varias formas de entrenamiento, en concreto cinco.

El fenómeno de la memoria de forma de doble camino (TWSME, Two-way Shape Memory Effect) se define como un cambio espontáneo de forma de un componente tanto al calentar como al enfriar. El material recuerda tanto la forma de *alta* temperatura como la de *baja*, así como las formas intermedias entre estos extremos, todo como consecuencia de una transformación de fase termoelástica y sin difusión.

Uno de los materiales que mejor desarrollan este fenómeno es la aleación equiatómica níquel-titanio, que es la aleación utilizada para este proyecto y que se utiliza notablemente en el ámbito industrial en actuadores, sistemas de regulación térmica de flujos, etc.

El efecto de memoria de forma de doble camino no es un fenómeno intrínseco de estos materiales. Al contrario que el fenómeno de memoria de forma de un camino, el material debe ser sometido a tratamientos termomecánicos llamados "entrenamientos". Existen cinco métodos de entrenamiento para desarrollar el efecto de memoria de forma de doble camino:

- El método de sobredeformación martensítica.
- La aplicación del ciclo de memoria de forma.
- El entrenamiento por ciclo pseudoelástico (tensión constante).
- La aplicación de ciclo térmico en martensita deformada y forzada.
- Un último método que actúa como una combinación de los métodos de memoria de forma y pseudoelástico.

Esto implica que se van a generar zonas sometidas a tensiones internas en la fase austenítica y que estas tensiones van a controlar indirectamente la transformación martensítica que se inducirá posteriormente por enfriamiento. En consecuencia, las diferentes técnicas que existen para obtener las zonas sometidas a tensión interna se consiguen, o bien deformando el material en la fase austenítica para obtener defectos permanentes en la estructura tales como dislocaciones, o bien deformando el material con objeto de obtener martensita inducida por tensión, bien generando precipitados de martensita que sean estables y no desaparezcan cuando se caliente el material por encima de la temperatura de transformación martensita-austenita.

-El **método I** se corresponde con el efecto de memoria de forma de doble camino desarrollado por *sobredeformación* de la fase martensítica. Los pasos a seguir en esta rutina son: enfriamiento del material por debajo de M_f , a continuación se deforma severamente excediendo el límite de completa recuperación y finalmente calentar por encima de A_f . Al volver a calentar hasta la fase austenítica, la aleación no recuperará completamente la forma original, debido a la excesiva deformación aplicada, lo que generará una deformación permanente acumulada.

-El **método II** corresponde al entrenamiento por aplicación de *ciclo térmico* en martensita deformada y forzada. En este caso, los pasos a seguir son: se enfría la muestra por debajo de M_f , se deforma para obtener martensita inducida por tensión, posteriormente se ancla la muestra en esa posición deformada y, por último, se calienta por encima de A_f .

-El entrenamiento por ciclo pseudoelástico, *bajo tensión constante*, corresponde al **método III**. En este caso, el material es sometido a una tensión constante en la fase austenítica con objeto de obtener una cierta cantidad de martensita inducida por tensión. Manteniendo esa tensión, el entrenamiento consiste en enfriar por debajo de M_f y calentar por encima de A_f un número determinado de ciclos.

-El **método IV** consiste en la aplicación del ciclo de memoria de forma. Consiste en recuperar, una y otra vez, la forma del SMA tras una deformación.

-El **método V** es la combinación de los métodos de memoria de forma y pseudoelástico.

Las rutinas de entrenamiento empleadas se pueden representar esquemáticamente en un diagrama tridimensional tensión-deformación-temperatura. En la figura 14 podemos ver la representación de los tres primeros métodos (Método I, Método II y Método III).

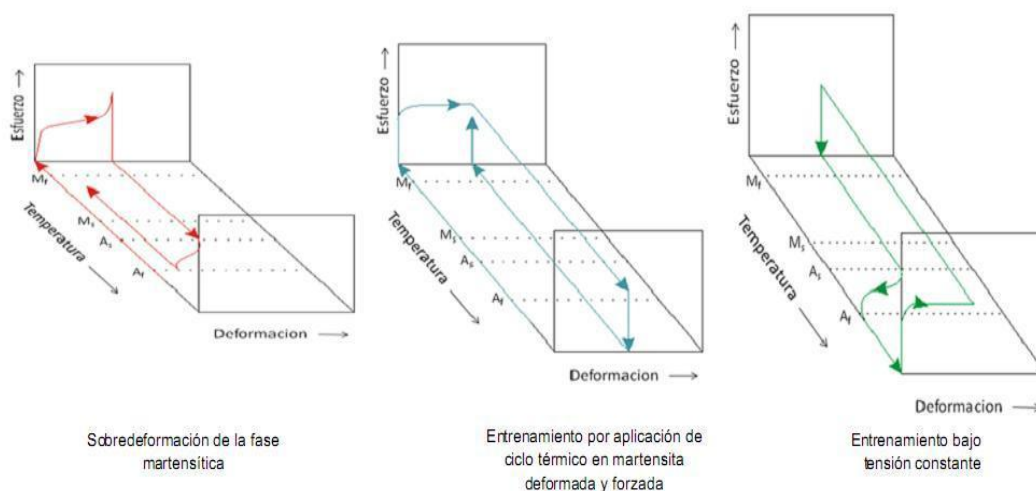
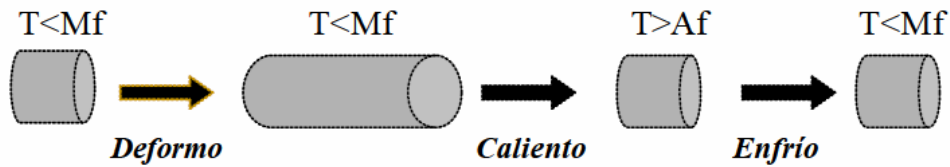


Figura 14: Tres métodos para el entrenamiento de un SMA. [8]

Efecto Memoria de forma simple



Efecto Doble Memoria de forma

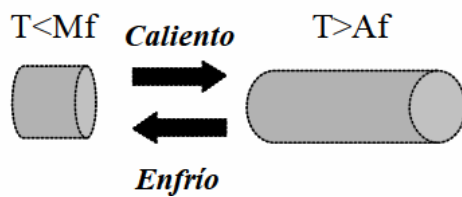


Figura 15: Comparación de la memoria simple y memoria doble.

Tal y como se ha dicho antes este efecto de doble memoria se logra haciendo muchas veces el ciclo de memoria simple. Es un proceso llamado *Educación o Adiestramiento* del material [9]. Con este proceso se puede conseguir que el material recuerde sucesivamente y de forma cíclica tanto la forma caliente como la forma fría.

2.5 Aplicaciones

Una vez que conocemos mejor el SMA y explicadas sus características más importantes, vamos a proceder a explicar cuáles pueden ser sus aplicaciones y usos en las diversas ramas de la industria. Cada vez están más presentes y sus usos son diferentes dependiendo del campo en el que nos encontremos.

Antes de clasificar las aplicaciones de estas aleaciones, es conveniente, en primer lugar, saber para qué se pueden usar: el efecto memoria de forma puede ser usado para generar movimiento o fuerza, mientras que la superelasticidad, puede almacenar energía de la deformación.

Campo de la Medicina

En este campo podemos encontrar diferentes tipos de SMAs y diferentes aplicaciones. Para los huesos rotos se pueden reparar con las aleaciones con memoria de forma. La placa de aleación tiene una temperatura de transferencia de memoria que está cerca de la temperatura corporal, y se une a los dos extremos del hueso roto. Con el calor del cuerpo, la placa quiere contraerse y retener su forma original, por lo tanto, ejerce una fuerza de compresión sobre el hueso roto en el lugar de la fractura. Después de que el hueso se ha curado, la placa continúa ejerciendo la fuerza de compresión, y ayuda a fortalecer durante la rehabilitación.

También son utilizadas para el refuerzo de arterias y venas. Cuando los vasos sanguíneos son obstruidos, un tubo de aleación (figura 16) se tritura y se introduce en las venas obstruidas. El metal con memoria tiene una temperatura de transferencia cerca de calor del cuerpo humano, por lo que el metal con memoria se expande, pudiéndose abrir las arterias obstruidas. Podemos encontrar más información en los artículos [10], [11].



Figura 16: Estructura tubular llamada “Stent”.

En la rama de la Odontología se utilizan para la ortodoncia. Sustituyen a los cables dentales normalmente utilizados. Se utiliza para los frenos y arcos de alambre dentales, ya que el material está a una temperatura constante, y debido a la superelasticidad del metal con memoria, los alambres conservan su forma original. La ventaja de estos materiales es que no necesitan ser tensados continuamente [10] ya que están a la temperatura constante de la boca.



Figura 17: Aparato dental hecho con Nitinol.

Campo de la Construcción

En el campo de la construcción no están muy implantados los SMAs debido a las dimensiones de las estructuras y al consumo que estos tendrían. Estos materiales son usados en estructuras antisísmicas como amortiguadores [12], aprovechando su superelasticidad, para evitar el desprendimiento de paredes o la separación de los diferentes tramos de un puente.

Campo de la robótica

En la robótica es más sencillo imaginarse donde podemos encontrarnos este tipo de materiales. Los podemos encontrar en sitios cuya función sea mover articulaciones o mecanismos y en los sitios que puedan sustituir actuadores. Un ejemplo sería una mano robótica cuyos dedos sean hilos de Nitinol controlados para poder articularlos y así poder manipular objetos con facilidad (Véase Figura 1).

Otros campos

- **Seguridad y sistemas de protección contra incendios:** Las líneas que transportan fluidos y gases altamente inflamables y tóxicos deben tener una gran cantidad de control para prevenir los eventos catastróficos. Los sistemas pueden ser programados con aleaciones de memoria para apagar de inmediato en presencia de aumento de calor. Esto puede disminuir en gran medida los problemas devastadores en las industrias que involucran productos



petroquímicos, semiconductores, productos farmacéuticos y grandes calderas de petróleo y gas.

- **Palos de golf:** una nueva línea de palos y cuñas se ha desarrollado usando aleaciones con memoria de forma. Se insertan en los palos de golf y al ser superelástico, mantienen la bola en la cara del palo más largo. Como la pelota entra en contacto con la cara del palo, experimenta un cambio en la estructura metalúrgica. La elasticidad aumenta el efecto a la pelota, y le da a la pelota más "mordida", ya que golpea el Green.
- **Palas de helicóptero:** el rendimiento de las palas de helicóptero dependen de vibraciones. Con metales de memoria en las fichas de control de los extremos de salida de las palas, los pilotos pueden volar con mayor precisión
- **Marcos de Anteojos:** En ciertos anuncios publicitarios, las empresas demuestran monturas de gafas que se pueden doblar hacia atrás y adelante, y mantienen su forma. Estos marcos están hechas de metales con memoria, demostrando superelasticidad.
- **Protección anti-quemaduras:** Selección de la temperatura y sistema de control para los baños y las duchas, [13]. Los metales de memoria pueden ser diseñados para restringir el flujo de agua mediante la reacción a diferentes temperaturas, lo cual es importante para evitar quemaduras.

Pese a todo lo anterior, puede dar la imagen de que las aplicaciones de estas aleaciones son extensas. Pero la realidad es que todavía existen muchas limitaciones que hacen que sea necesario profundizar en el diseño y modelación de los SMA [14]. La mayoría de las aplicaciones se han desarrollado por el método (Prueba-error).



Capítulo 3

3. SOFTWARE UTILIZADO

3.1 MATLAB

MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones, totalmente integrado y orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional.

MATLAB dispone también en la actualidad de un amplio abanico de programas de apoyo especializado, denominadas Toolboxes, que extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estas Toolboxes cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación, destacando entre ellos la 'Toolbox' de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neurales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc. Es un entorno de cálculo técnico, que se ha convertido en estándar de la industria, con capacidades no superadas en computación y visualización numérica.

De forma coherente y sin ningún tipo de fisuras, integra los requisitos claves de un sistema de computación técnico: cálculo numérico, gráficos, herramientas para aplicaciones específicas y capacidad de ejecución en múltiples plataformas.

Gracias a MATLAB podemos investigar algunos de los comportamientos de los hilos de Nitinol, y poder observar en tiempo real lo que está ocurriendo.

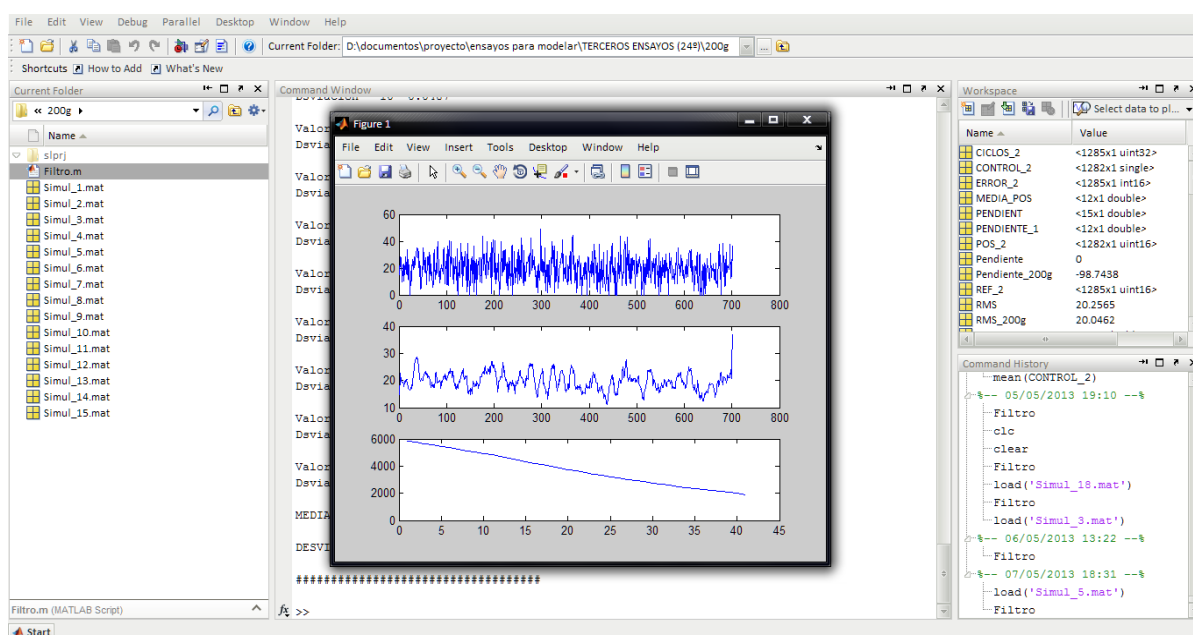


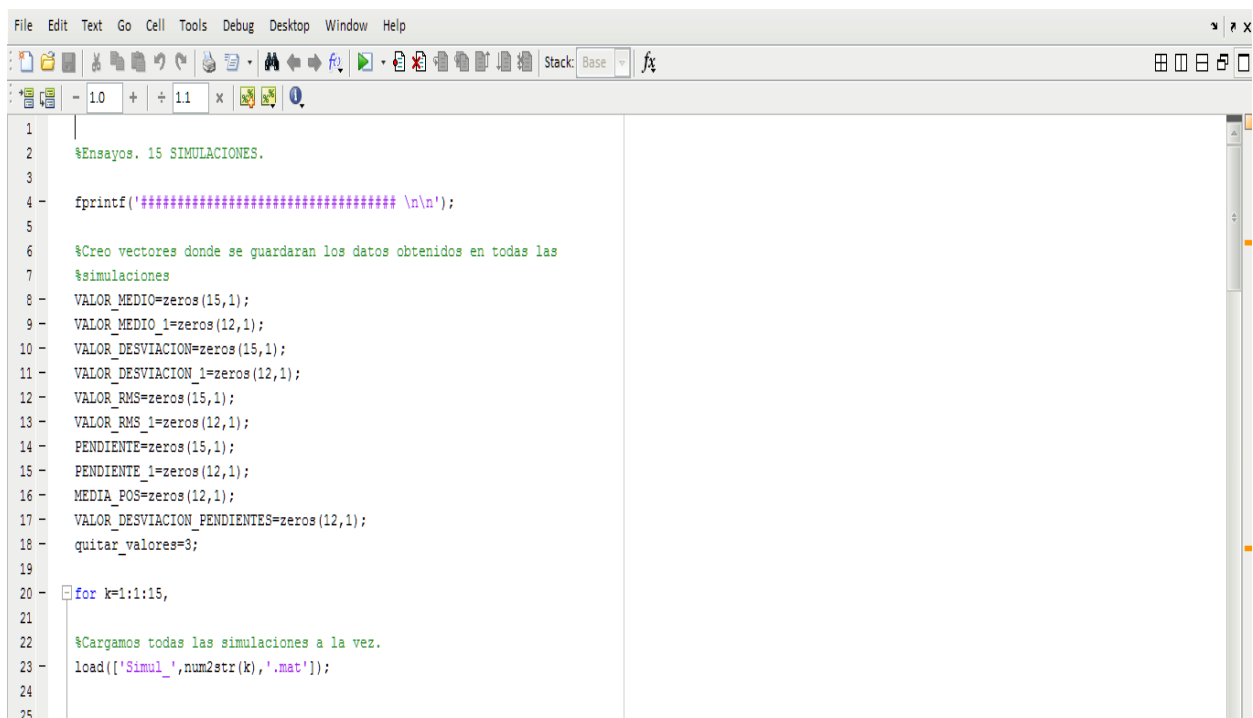
Figura 18: Interfaz de la pantalla principal de MATLAB.

Scripts

Dentro de MATLAB está lo que se denomina *Scripts*, que son conjuntos de comandos de MATLAB almacenados en archivos de texto plano. Al escribir el nombre del archivo de comandos en MATLAB, los comandos se ejecutan como si se hubieran escrito en el teclado. Los archivos de script debe terminar con la extensión ``.m`` (por ejemplo ``myScript.m``), y muchas veces estos archivos se conocen como archivos-m.

En este proyecto se utilizan los Scripts para elaborar un programa en el cual poder analizar los datos obtenidos en las simulaciones hechas. Cuando se ejecuten los Scripts se podrá ver en la pantalla principal todos los datos obtenidos, y así, poder analizarlos y sacar las conclusiones pertinentes.

Se desarrollarán varios Scripts, para el modelaje de los distintos pesos y para la verificación de estos, es decir, se harán simulaciones con distintos pesos y se modelaran (los pesos se aumentarán de 30g en 30g) y luego se hará otro Script para comprobar que se pueden diferenciar las distintas cargas en el SMA.



```
1
2 %Ensayos. 15 SIMULACIONES.
3
4 fprintf('##### \n\n');
5
6 %Creo vectores donde se guardaran los datos obtenidos en todas las
7 %simulaciones
8 VALOR_MEDIO=zeros(15,1);
9 VALOR_MEDIO_1=zeros(12,1);
10 VALOR_DESVIACION=zeros(15,1);
11 VALOR_DESVIACION_1=zeros(12,1);
12 VALOR_RMS=zeros(15,1);
13 VALOR_RMS_1=zeros(12,1);
14 PENDIENTE=zeros(15,1);
15 PENDIENTE_1=zeros(12,1);
16 MEDIA_POS=zeros(12,1);
17 VALOR_DESVIACION_PENDIENTES=zeros(12,1);
18 quitar_valores=3;
19
20 for k=1:1:15,
21
22 %Cargamos todas las simulaciones a la vez.
23 load(['Simul_',num2str(k),'.mat']);
24
25
```

Figura 19: Parte del Script desarrollado.



3.2 SIMULINK

Hasta ahora hemos visto que MATLAB dispone de un entorno de programación con líneas de órdenes, ahora veremos cómo se puede suplementar utilizando un interfaz de usuario gráfico llamado SIMULINK. Este entorno nos permite describir gráficamente un sistema dibujando su diagrama en bloques, que resulta muy conveniente para la simulación y análisis de sistemas dinámicos.

SIMULINK es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Admite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continuas de los sistemas embebidos.

SIMULINK ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solvers para modelar y simular sistemas dinámicos. Se integra con MATLAB, lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB para llevar a cabo los análisis.

Los ficheros tipo Script pueden utilizar las variables del entorno de trabajo (Workspace) y devuelve los resultados a este mismo entorno. Se trata por tanto de trabajo con variables globales. Se suelen utilizar para tareas de inicialización o de definición de un gran número de variables en el entorno de trabajo. En el proyecto, cuando se hacen las simulaciones, las variables de interés se guardarán en el entorno de trabajo Workspace, y posteriormente serán analizadas con los Script desarrollados.

Gracias a SIMULINK podemos generar el código C del diagrama de bloques general con el que controlamos la SMA, para luego poder abrirlo con el Keil uVision, compilarlo y transcribirlo a la placa controladora que se utiliza en el banco de pruebas.

Se hace esto porque no podemos compilarlo directamente en SIMULINK. En un futuro se pretende prescindir de este paso y compilarlo directamente en el entorno de MATLAB con la placa apropiada.

El diagrama de bloques general utilizado en SIMULINK para poder hacer las simulaciones de los SMAs es el siguiente:

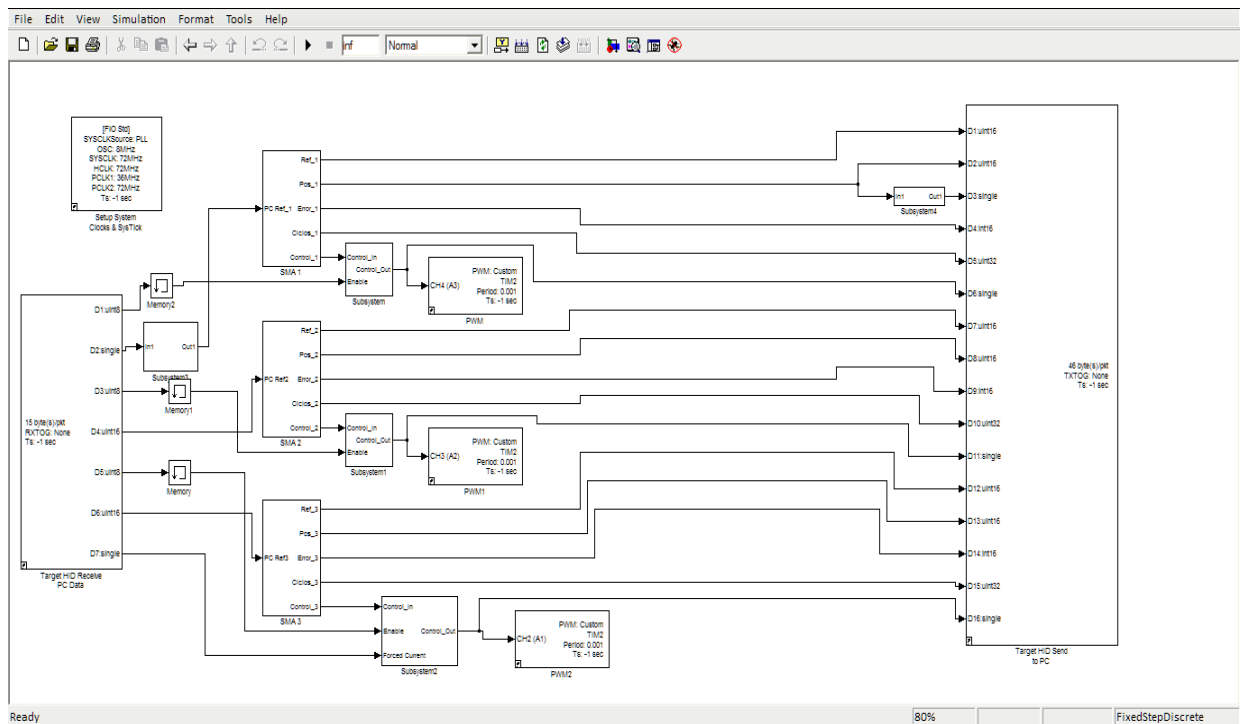


Figura 20: Diagrama de bloques en SIMULINK para el control de los SMAs.

3.3 Placas de control

Hoy en día el uso de sistemas embebidos en la industria está muy integrado debido a que la mayoría de los procesos que se realizan necesitan de estos sistemas [15]. El banco está controlado por un microcontrolador M3 STM32F103 cuyas especificaciones técnicas están en el apéndice A.

Usos

Los lugares donde se pueden encontrar este tipo de microcontrolador son numerosos y de varias naturalezas. A continuación se muestran algunos ejemplos:

- En donde más se utilizan son en Sistemas Embebidos, es decir, un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas funciones dedicadas frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real.
- En la industria: para controlar un proceso de montaje o producción de una fábrica.
- Sistemas radar de aviones. El procesamiento de la señal recibida o reflejada del sistema radar embarcado en un avión requiere alta potencia de cálculo además de ocupar poco espacio, pesar poco y soportar condiciones extremas de funcionamiento.
- Equipos de medicina en hospitales y ambulancia.
- Proyectos espaciales.
- En electrodomésticos (lavadoras, hornos, microondas, etc.)

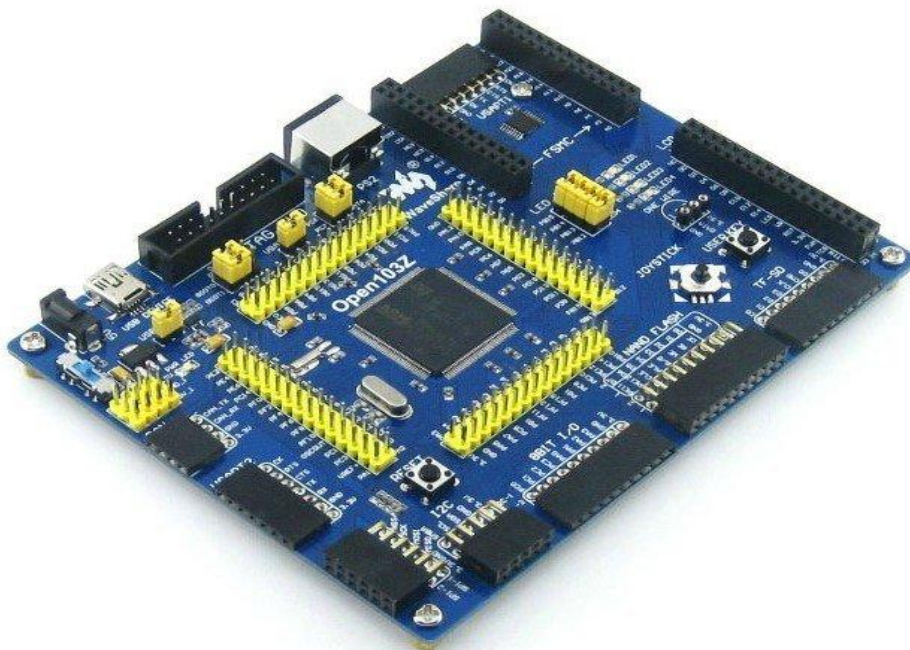


Figura 21: Microcontrolador M3 STM32F103.



Ventajas y desventajas

-Ventajas

- No necesitan de un PC.
- Trabajan en tiempo real.
- Bajo coste económico.
- Poco consumo de energía.
- Rapidez.

-Desventajas

- Reprogramación complicada.

3.4 Keil uVision

Las herramientas de desarrollo Keil están diseñadas para el desarrollo de software profesional. Sin embargo los programadores de todos los niveles lo utilizan para obtener el máximo rendimiento de las arquitecturas de microcontroladores integrados que son compatibles. Las herramientas desarrolladas por Keil aprueban los microcontroladores más populares y son distribuidos en varios paquetes y varias configuraciones, dependiendo de la arquitectura.

Al igual que todo el software basado en uVision Keil, los conjuntos de herramientas proporcionan un potente ambiente fácil de aprender y de usar para el desarrollo de aplicaciones embebidas. Se incluyen los componentes necesarios para crear, depurar, y montar los archivos fuente C / C ++, e incorporar la simulaciones de los microcontroladores y de los dispositivos periféricos relacionados.

Se utiliza este programa, como se ha mencionado anteriormente, para compilar el código C generado en SIMULINK y transcribirlo a la placa del banco de pruebas. Este es el único uso que daremos a este programa.

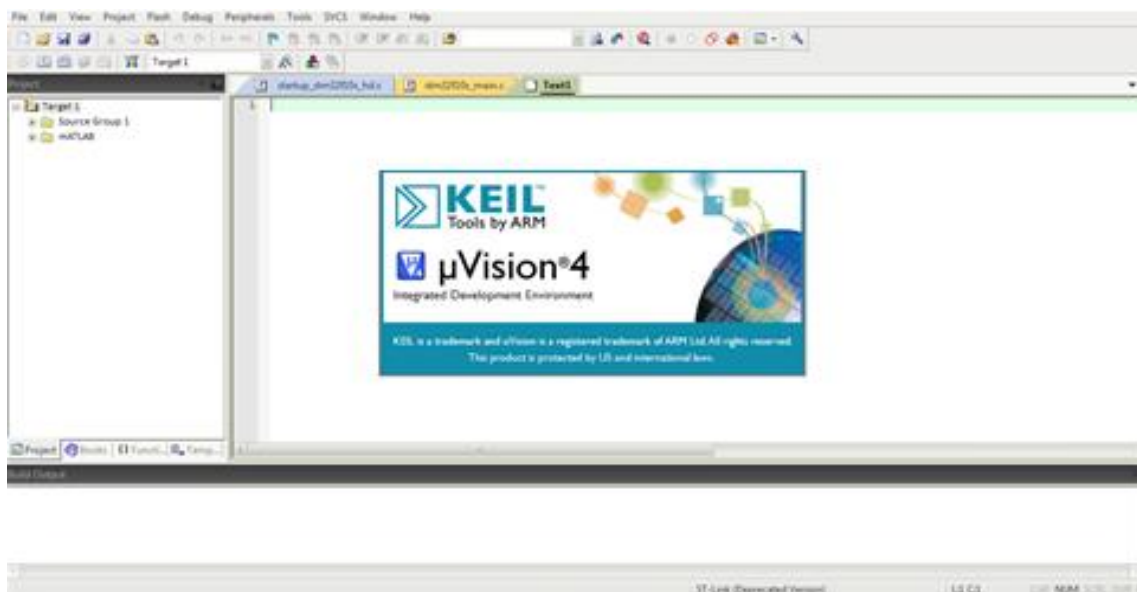
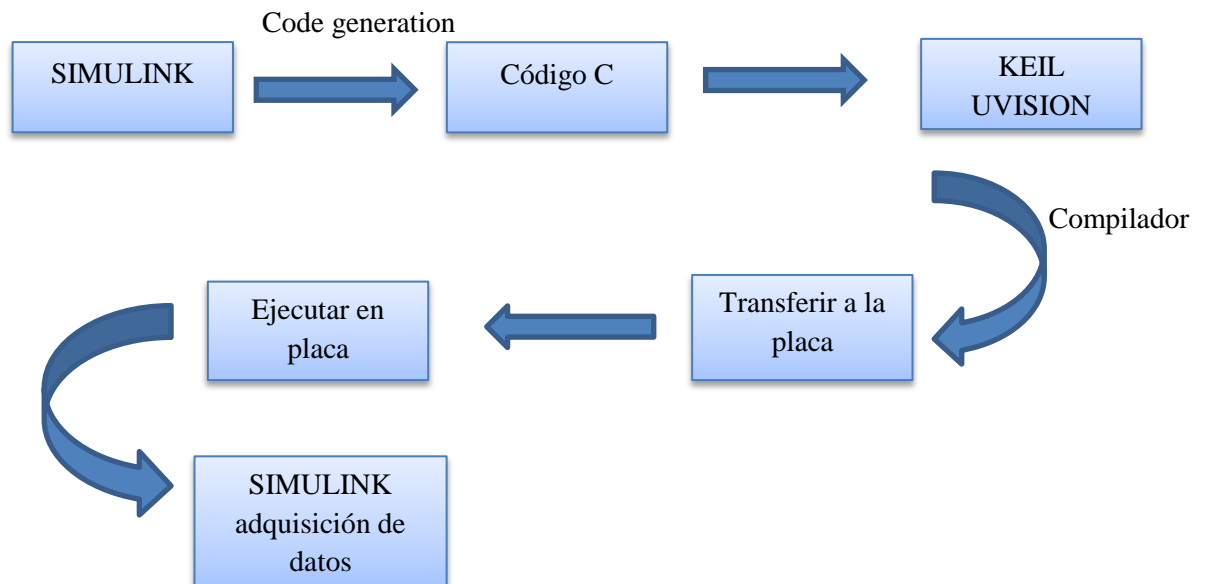


Figura 22: Interfaz de la pantalla principal de KEIL uVision 4.

3.5 Esquema general

El esquema general del proceso por el cual se estudia los comportamientos de los SMAs es el siguiente:

-Desde SIMULINK se genera el código C (code generation) y se abre en el Keil uVision como un nuevo proyecto para compilarlo y ver si tiene fallos. Después de asegurarnos que todo el código C está bien, sin errores, lo transcribimos a la placa de control del banco de pruebas. Una vez transcrito, desde SIMULINK, ejecutamos nuestro modelo con la placa ya programada y lista para poder controlar el SMA. Una vez ejecutado, podremos adquirir todos los datos de interés. A continuación se puede ver un esquema general de lo citado anteriormente.





Capítulo 4

4. BANCO DE PRUEBAS

4.1 Descripción general

En este capítulo se presentará el banco de pruebas realizado en la Universidad Carlos III de Madrid, con el que se desarrollará este proyecto. Gracias a este banco podemos estudiar y caracterizar a los SMAs pudiendo ver muchos de los comportamientos de estos materiales. Este banco es capaz de controlar en posición el SMA gracias a un sensor magnético de posición. En él se pueden hacer diversas simulaciones: trabajar de forma independiente con cada uno de los SMAs, como por ejemplo, llevar la SMA a una posición fija o variar la posición entre un mínimo y un máximo, o trabajar de forma antagónica para poder simular los movimientos de músculos. Estos ensayos de activación se hacen por calentamiento usando *corriente eléctrica*.

Todos los dispositivos del banco están gobernados por un ordenador capaz de adquirir datos. Éste dispondrá de los programas MATLAB y KEIL. MATLAB será capaz de controlar todos los dispositivos del banco y de proporcionar todos los datos de los ensayos realizados.

El banco posee tres carriles para hacer pruebas con tres hilos independientes. En nuestro caso, solo utilizaremos uno de los carriles ya que solo se trabajará con un hilo. El banco trabajará a una frecuencia de 1 KHz.

A continuación podemos ver el banco de pruebas.

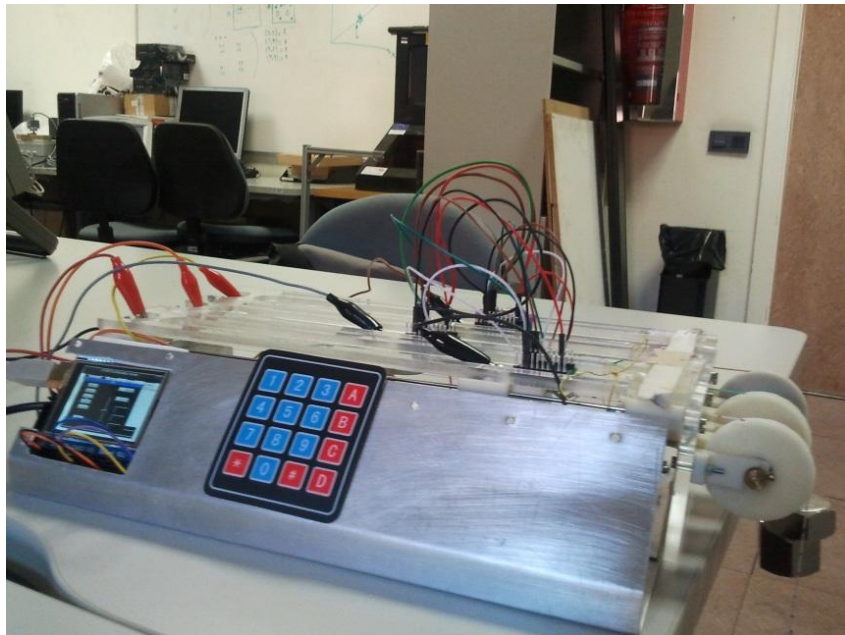


Figura 23: Banco de pruebas de la Universidad Carlos III de Madrid.

4.2 Sensor magnético de posición

El banco dispone de tres sensores magnéticos de posición, uno por cada carril. Gracias a estos sensores se va a poder controlar la posición del hilo de Nitinol. En el sensor hay pequeños imanes en pequeñas celdas, unos orientados hacia el Norte y otros hacia el Sur de forma intercalada, véase figura 24, por los cuales el sensor utilizado tiene una precisión de micras. Si fluye corriente por el sensor y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. Si se conoce el valor de la corriente, entonces se puede calcular la fuerza del campo magnético y ver cuánto se ha contraído el SMA.

Debido a sus características, era el que mejor se adaptaba al banco y sobre todo por la precisión que tiene.



Figura 24: Imanes del sensor orientados hacia Norte y Sur.

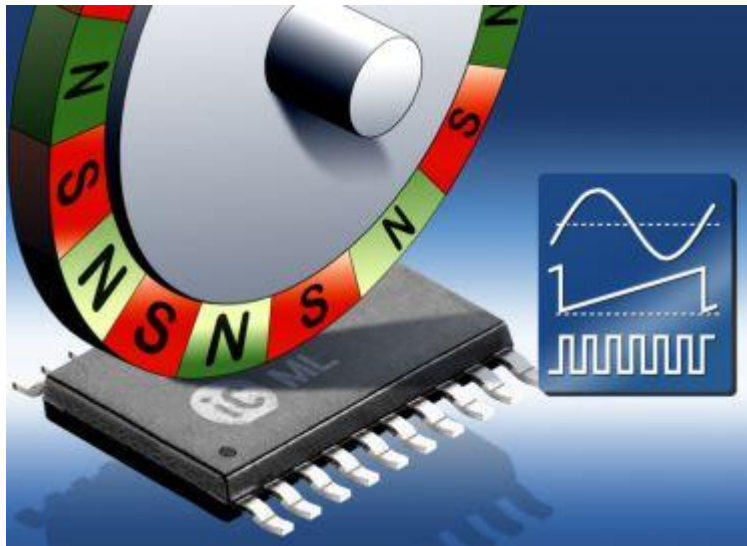


Figura 25: Sensor magnético de posición.



Capítulo 5

5. ENSAYOS Y ANALISIS



En este capítulo se hablará de todos los ensayos realizados, de sus objetivos, cómo se han realizado, lo que se necesita para poner en marcha el banco de pruebas, y de los dos tipos de ensayos pensados para la estimación de la carga.

5.1 Descripción de los ensayos

En este apartado se hará una descripción de cómo se realizan los ensayos, de lo que se necesita para poder realizarlos y de lo que se pretende conseguir con dichos ensayos.

5.1.1 Objetivos de los ensayos

El objetivo principal de los ensayos es calcular la carga que soporta el SMA de tal manera que no se utilice un sensor para medirla. Para ello, se llevará al SMA a una posición fija, se dejará un tiempo y se estudiará su señal de CONTROL y de POSICIÓN. Con estas dos señales se hará todo lo posible para determinar el peso y poder ahorrarse un sensor que lo mida. Una vez que se haya hecho la adquisición de las variables a estudiar, se desarrollará un programa en MATLAB (un Script) para modelar nuestro sistema. Después del modelado, como trabajo extra, se hará otro programa para la verificación, es decir, para ver si el modelo hecho cumple las expectativas del proyecto y se pueda determinar la carga que soporta el hilo.

También se tendrá en cuenta el error que se estará cometiendo a la hora de realizar y analizar los ensayos, ya que si el error es grande no servirá de nada que se diga que el peso es 100 gramos con un error de 50 gramos. Más adelante veremos que un factor muy importante que hará que el error sea muy grande será la temperatura a la que se encuentra el laboratorio donde se han realizado los ensayos. Por lo tanto, debemos cumplir dos objetivos:

- Calcular la carga en actuadores de tipo SMA sin ningún tipo de sensor.
- El error no debe de ser mayor del 10%.

Como se ha mencionado antes, se estudiarán las señales de CONTROL y POSICIÓN del hilo, es decir, se realizaran dos tipos de ensayos,

- Ensayo a referencia fija, estudiando solo la señal de CONTROL.
- Ensayo de relajación, estudiando solo la señal de POSICIÓN.

Siendo los objetivos los mismos para los dos tipos de ensayos, **CALCULAR LA CARGA SIN SENSOR.**

5.1.2 Preparación de la muestra

Para la realización de los ensayos se necesitará un hilo de Nitinol (de la marca *Dinalloy*) cuyas especificaciones técnicas se encuentran en el apéndice B, el banco de pruebas, pesas (de diferentes pesos), un PC, una fuente de alimentación, placa microcontroladora y un sensor de posición magnético. Veremos en los siguientes apartados que también se necesitará una caja de cartón para “asilar” el banco de pruebas de las variaciones de temperatura.

En siguiente tabla se muestran las características principales del hilo:

Tabla 6: Características principales del hilo de Nitinol.

Longitud (cm)	Diámetro (")	Fuerza máxima (g)	Resistencia (Ω/m)	Corriente Max. (A)
15	6 milésimas de pulgada ¹	500g	55	0.5

La fuente de alimentación se conectará a 8.5 V, el PC tendrá instalados el MATLAB y el KEIL UVISION y se dispondrán de varios pesos.



Figura 26: Fuente de alimentación utilizada.



Figura 27: Pesas utilizadas.

¹ 6 milésimas de pulgadas equivalen a 0.1524 mm de diámetro.

Una vez que tenemos montados todos los componentes necesarios para la realización de los ensayos, y los dos programas necesarios en funcionamiento y listos para la adquisición de datos (Véase esquema del apartado 3.5), necesitamos hacer un pequeño entrenamiento al SMA, sobre todo para poder definir la posición inicial, es decir, “posición cero”. Este entrenamiento se hace cada vez que se vaya a utilizar el banco debido a que el sensor de posición puede haberse movido o que el hilo se ha quedado contraído de pruebas que se han realizado días anteriores. El entrenamiento consiste en darle corriente y quitársela unas cuantas veces hasta que se vea en la gráfica que se obtiene de SIMULINK (gráfica de posición) que el SMA ha llegado a la “posición cero”. Se pone entre comillas porque dependiendo del ciclo de histéresis en que se encuentre el hilo, puede o no, llegar a la posición cero, pero siempre se acercará bastante a dicha posición.

Definidos los materiales necesarios y el entrenamiento que se debe aplicar al hilo, podemos empezar a realizar las simulaciones para su posterior análisis.

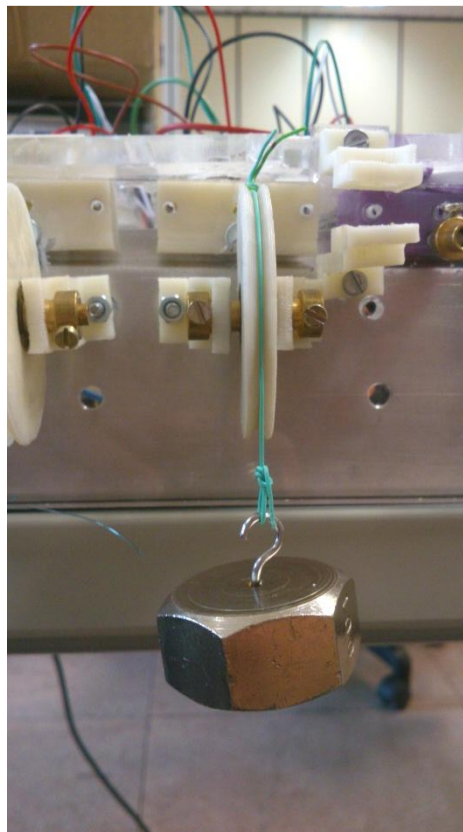


Figura 28: Muestra preparada para empezar los ensayos.



5.1.3 ¿En qué consisten los ensayos?

Básicamente consisten en llevar el SMA a una posición fija y dejarla en esa posición (referencia fija) durante un corto periodo de tiempo con distintos pesos colgados. Después cogeremos las variables de interés, es decir, la señal de CONTROL y la señal de POSICION del hilo y se analizarán con el programa hecho en el Script. En nuestro caso, se elegirá la referencia de 6000 (unidad de sensor), es decir, el SMA se ha contraído:

$$\text{Posición SMA} = 6000 \text{ unid sensor} \cdot 0.488^2 \frac{\mu m}{\text{unid sensor}} = 2928 \mu m \sim 3mm$$

Como la longitud del SMA utilizada es de 15 cm, el porcentaje con el que está trabajando es:

$$\text{Porcentaje con el que trabaja el SMA} = 2\%$$

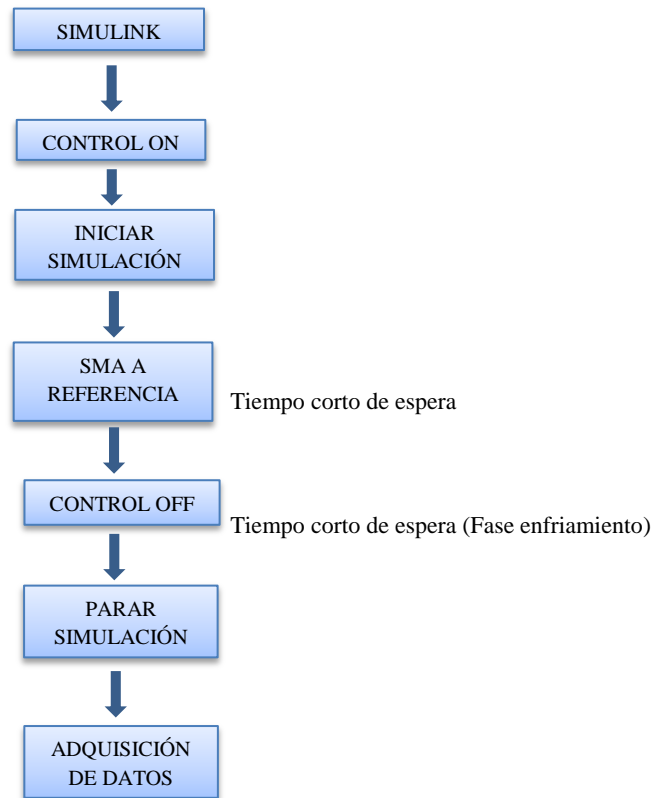
Lo que se pretende es estimar la carga que soporta el SMA, por lo tanto, se colgarán distintas cargas del extremo del hilo y se harán varias simulaciones. En concreto, por cada carga que se ponga, se realizarán 20 simulaciones: 15 para el modelado y 5 se guardarán para la posterior verificación de nuestro sistema. Se entrará en más detalles en los siguientes apartados.

Como hay dos tipos de ensayos, las simulaciones realizadas se harán para que se pueda estudiar tanto la señal de CONTROL como la de POSICIÓN a la vez, con lo que será más rápido y no habría que hacer varios tipos de simulaciones.

Para la realización de las simulaciones se han seguido unos pasos: primero se activa el control del SMA, luego se inicia la simulación, el SMA se mantiene un periodo corto de tiempo en la posición indicada, y por último, se desactiva el control y se deja unos segundos hasta que llegue a la “posición cero” (fase de enfriamiento), parando la simulación cuando llegue a dicha posición.

En conclusión, con el siguiente diagrama se entenderá mejor el procedimiento realizado de los ensayos.

² Los 0.488 micrómetros es la equivalencia en el mundo real de cada unidad de medida del sensor de posición utilizado.



El diagrama de bloques hecho en SIMULINK permite accionar un interruptor para activar-desactivar el control del hilo. En la figura 29 se puede observar el interruptor *ENABLE SMA 2*, que será el que se utilizará ya que solo estará habilitado el segundo carril del banco.

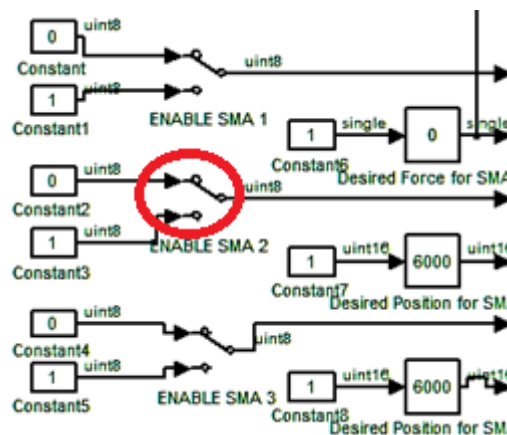


Figura 29: Interruptores para el control del hilo.

5.2 Tipos de ensayos

Como ya se ha mencionado anteriormente, se realizarán dos tipos de ensayos y en el capítulo de *conclusiones* se dirá cuál de los dos es más preciso para la consecución de los objetivos del proyecto. En este apartado se explicará más en detalle en qué consisten y que se estudiará de cada ensayo.

5.2.1 Ensayo a referencia fija

Este es el primer ensayo que se pensó desde un principio, estudiar la señal de CONTROL que se aplica al SMA, debido a que según vamos cambiando la carga en el extremo del hilo, ésta variará. La señal de CONTROL es la siguiente:

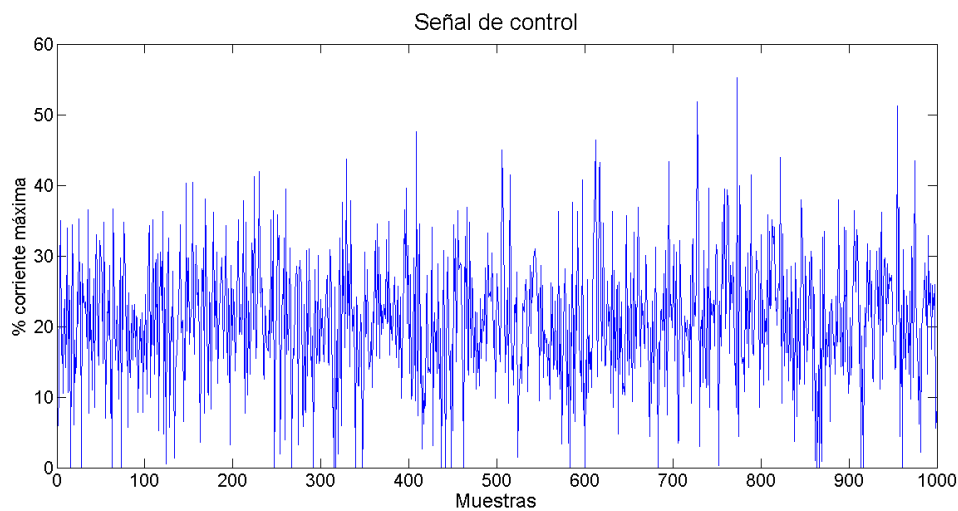
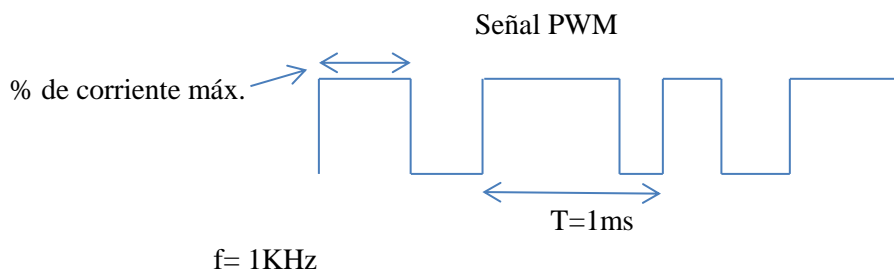


Figura 30: Señal de Control.

En el eje X se representan las muestras que se han obtenido en el tiempo de simulación. Cada 50 muestras equivalen a un segundo de simulación. En el eje Y se ha puesto porcentaje de corriente máxima que circula por el SMA, es decir:



Como se puede observar en la figura 30, la señal que se obtiene no es muy “limpia” y tiene varios picos que son errores debido a que algunos datos no se han leído correctamente, ya sea por el sensor magnético, o porque la adquisición de datos no ha funcionado bien por fallos en la electrónica del banco (outliers). Para estudiar esta señal se pensó en aplicarle un filtro para suavizarla y poder trabajar de una forma más sencilla. También se quitaran esos outliers ya que no valen para nada.

Después de probar varios filtrados, se decidió aplicar un filtro de tipo **Smooth**, que es el que mejor se adaptaba a nuestra señal. Este filtro es un filtro de media móvil en el que se puede cambiar el número de ventanas. En este caso las ventanas escogidas son 11. La señal filtrada es la siguiente:

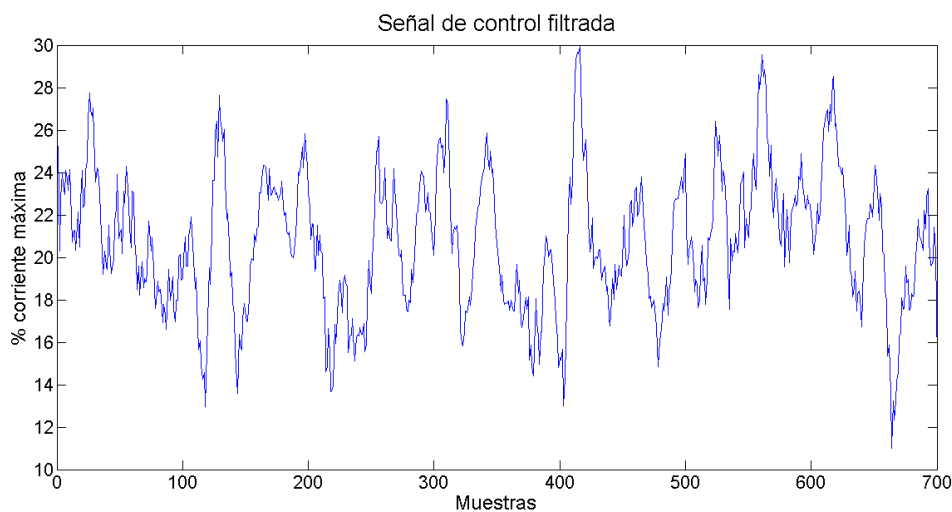


Figura 31: Señal de control suavizada con filtro Smooth.

Se puede observar que la señal es mucho más “limpia” y que los outliers han desaparecido. La eliminación de los outliers se ha hecho por el método de que todos los valores que varíen ± 40 (en el eje Y) respecto a la mediana, sean eliminados. Tanto el filtrado como la eliminación de los datos erróneos se han escrito en el Script que se ha desarrollado para el análisis de la señal.

Lo que se estudiará en este tipo de ensayo será el **valor medio** de la señal y la **desviación estándar**. La desviación estándar nos dará el error aproximado que estaremos cometiendo. Se entrará en más detalles en el capítulo 6.

En este ensayo hay que fijarse si los valores medios obtenidos en las simulaciones son o no lineales y constantes y si la desviación obtenida no es muy grande para que el error que estemos cometiendo no sea más del 10%.

5.2.2 Ensayo de relajación

En este otro tipo de ensayo se estudiará la señal de POSICIÓN del hilo. En concreto se estudiará la curva de bajada, es decir, la fase de enfriamiento. La señal que nos da directamente el banco es la siguiente:

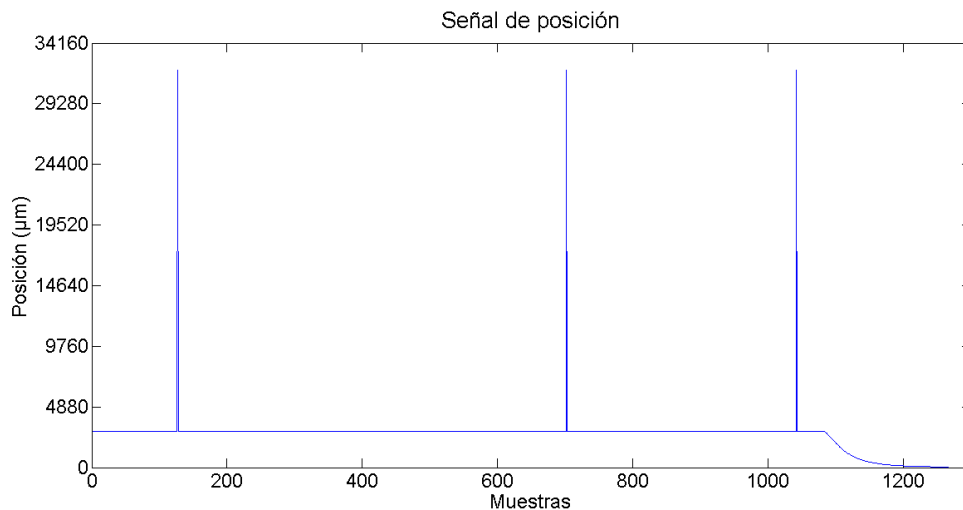


Figura 32: Señal de Posición.

En el eje X, al igual que en la señal de control, se representan el número de muestras obtenidas en el tiempo de la simulación. Cada 50 muestras equivalen a un segundo de simulación. Los números que representan el eje Y representan la posición en μm , es decir, lo que se ha contraído el hilo. Como se puede apreciar, en esta señal también aparecen outliers, con lo que se quitarán de la misma manera que se hizo con la señal de CONTROL, de tal manera que la señal quedará de la siguiente forma:

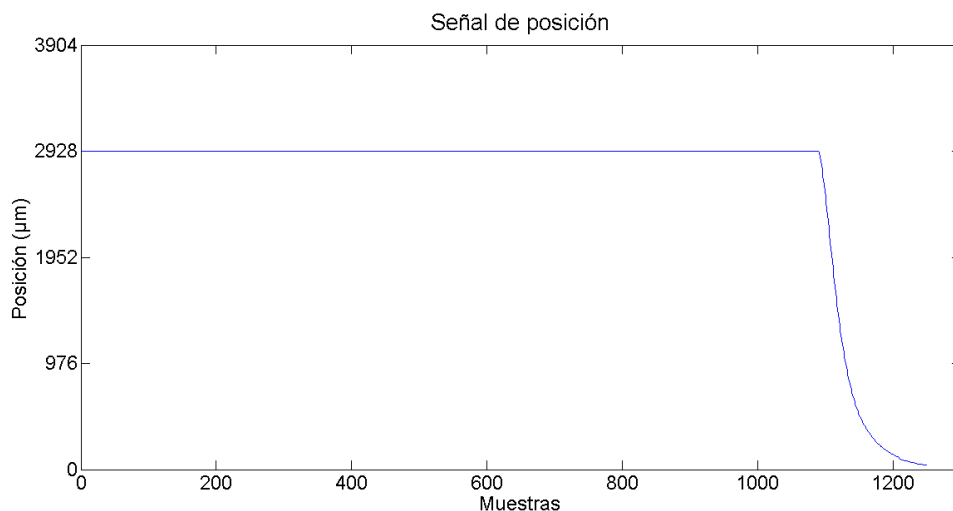


Figura 33: Señal de la Posición sin outliers.

Como se puede apreciar en la gráfica de arriba, el SMA se ha contraído aproximadamente 3mm ($6000 \text{ unid sensor} \cdot 0.488 \frac{\mu\text{m}}{\text{unid sensor}}$) y se mantiene en esa posición durante un tiempo hasta que se quita el control y vuelva a la posición cero.

En este ensayo vamos a estudiar solo la curva de bajada, es decir, cuando se deja de aplicar corriente al hilo (control OFF) y este se relaja volviendo a la posición cero. Se pensó este tipo de ensayos porque dependiendo de la carga que se cuelgue en el extremo del hilo, la curva variará, en concreto su **pendiente**. Es lógico, cuanto más peso se ponga, más va a tirar del hilo, con lo que llegará antes a su posición inicial. La pendiente irá aumentando conforme al aumento de peso.

En el Script, se ha programado para que directamente aparezca la curva de bajada y poder estudiarla mejor y más a fondo, véase figura 34.

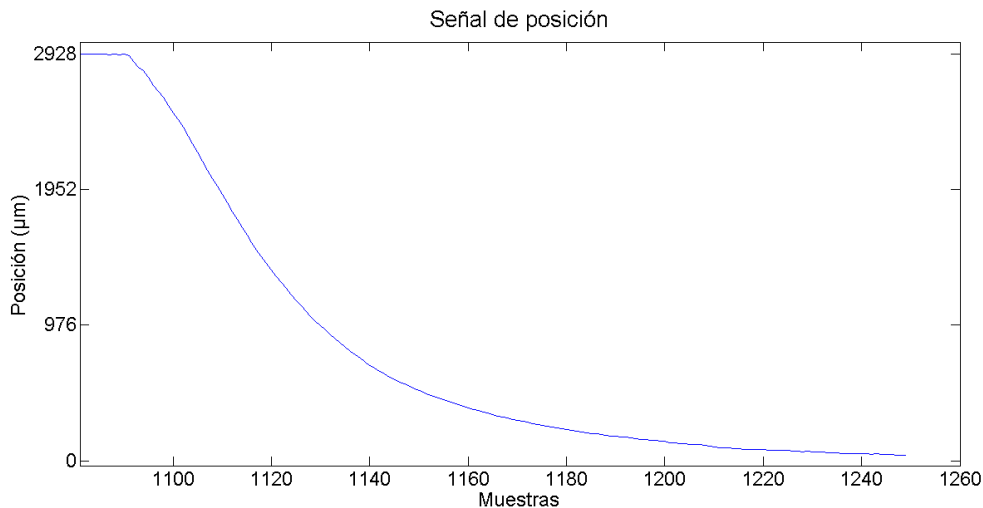


Figura 34: Curva de bajada del SMA en una de las simulaciones (fase de enfriamiento).

En conclusión, en este ensayo se estudiará la **pendiente** y la **desviación estándar**, que será la que nos dará un error aproximado y nos dirá si las simulaciones han salido buenas o malas.

Se tendrá en cuenta si los valores de las pendientes van aumentando y si se puede distinguir esa pendiente entre varios pesos para poder modelar nuestro sistema. Se mirará también el error que se está cometiendo para luego poder compararlo con el otro tipo de ensayo.



Capítulo 6

6. EXPERIMENTACIÓN



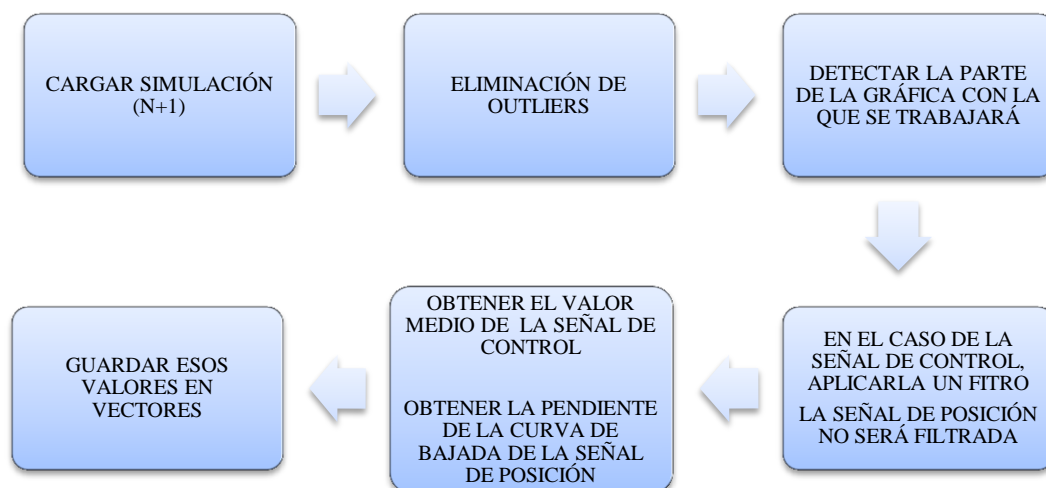
En este capítulo se entrará más a fondo en los ensayos realizados, se hablará de los primeros ensayos realizados, de los problemas encontrados y de cómo se han solucionado, se explicará cómo se ha estudiado los dos tipos de ensayos propuestos para la estimación de la carga y se dirán todos los valores importantes que se obtienen de dichos ensayos.

6.1 Ensayos preliminares

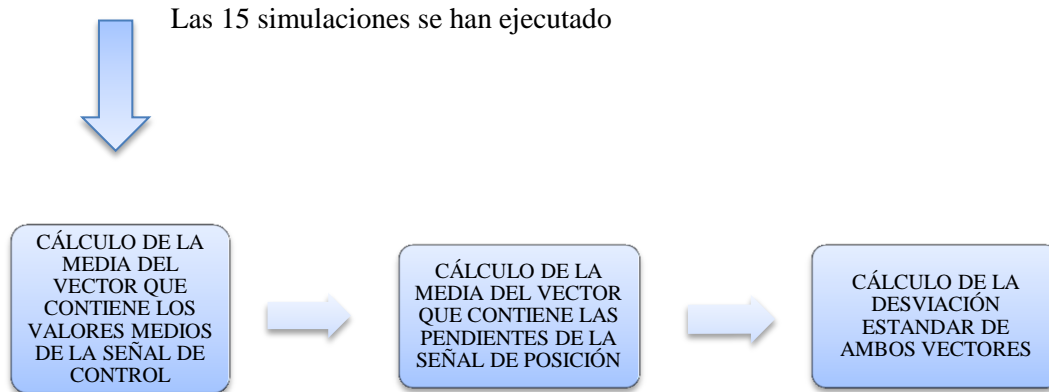
A continuación se van a describir los primeros ensayos realizados, que son los que nos darán las pautas para poder encontrar los problemas que se tendrán y poder solucionarlos para realizar los ensayos definitivos. Estos serán una parte importante del proyecto ya que se gracias a ellos se intentará solucionar los problemas que haya y se tratará de estimar la carga de una manera viable.

Lo importante de los ensayos es estudiar las dos señales ya mencionadas y para ello utilizaremos el Script que se ha desarrollado. El Script nos dará todos los datos que nos interesarán. Como ya se ha mencionado, se estudiará las dos señales en el mismo Script. En el caso de la señal de CONTROL los valores importantes que sacaremos serán el valor medio de la señal de cada simulación y la desviación estándar que tienen esos valores. Para el caso de la señal de POSICIÓN los valores serán la pendiente de la curva de bajada en cada ensayo y la desviación que tienen.

El modelo programado en el Script será de la siguiente manera:



Este proceso se realiza hasta que se carguen las 15 simulaciones. Se tendrán dos vectores, uno contiene todos los valores medios y el otro todas las pendientes. Una vez que se carguen todas las simulaciones se hará lo siguiente:



Este fue el primer modelo que se desarrolló para analizar las señales. Se empezó poniendo diferencias de 100 gramos en cada simulación, pero se diferenciaban bien. El problema llegó cuando se empezó a poner pesos con una diferencia de 50 gramos. A continuación se expondrán algunos ensayos preliminares de la señal de control para ver todo lo que se pueda mejorar.

-Ensayo 200 gramos

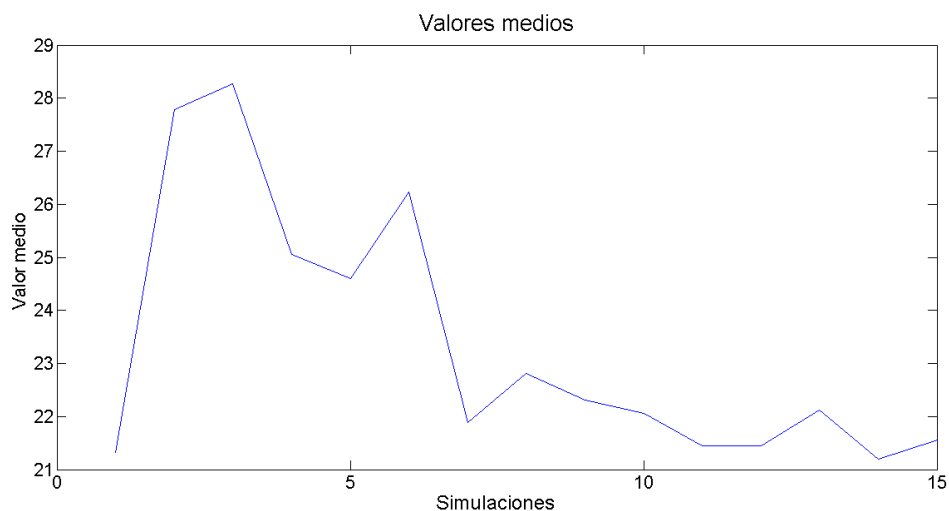


Figura 35: Valores medios de las 15 simulaciones para 200 gramos.

En la gráfica podemos observar todos los valores que tenemos de nuestro vector. Como se puede apreciar, los valores no son constantes, no siguen una linealidad. Esto

significa que hay bastante diferencia entre simulación y simulación con lo que la desviación estándar que hay será bastante grande, es decir, se estará cometiendo un error grande. Cuando se habla de desviación, se está hablando de la diferencia que hay entre el valor medio total de todas las simulaciones respecto al valor medio de cada simulación, para poder ver lo que se ha desviado cada simulación respecto al valor medio total. Veamos otro ensayo.

-Ensayo 250 gramos

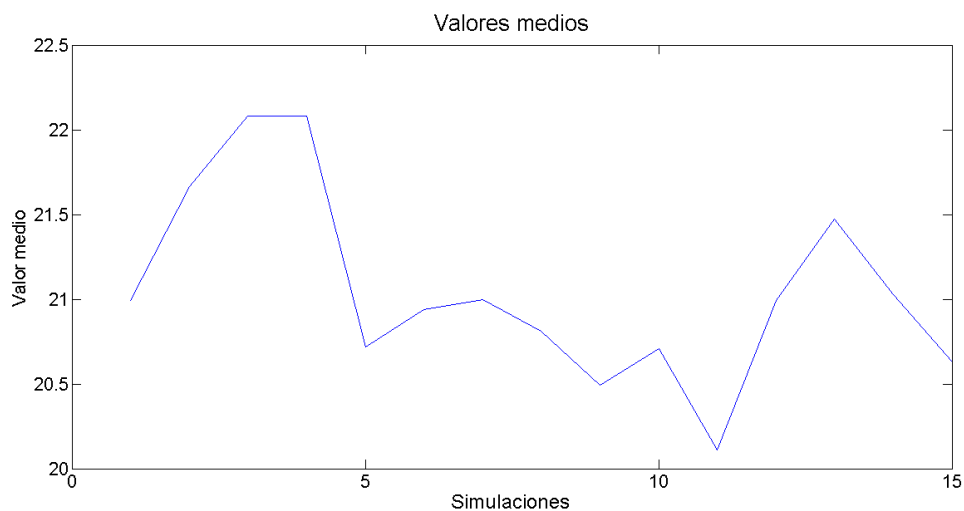


Figura 36: Valores medios de las 15 simulaciones para 250 gramos.

También se puede observar que varía un poco menos que con 200 gramos pero que igualmente no se asemeja a una gráfica lineal, que es lo que se quiere conseguir. Todo esto implica que la desviación calculada será muy grande y el ensayo no valdrá debido al gran error que tendrá. Todos los ensayos preliminares no valdrán para nada ya que no siguen una linealidad.

Con estos dos ejemplos de ensayos se puede verificar que aparecen algunos problemas y se tendrán que solucionar. En el siguiente apartado se dirán los problemas encontrados y de cómo se solucionarán para poder aplicar un modelo definitivo al proyecto.

6.2 Problemas experimentales

Los ensayos preliminares nos darán un varemos de donde están los problemas y como se pueden solucionar. Los principales problemas encontrados en los ensayos son los siguientes:

- Una vez recopilados todos los datos en el laboratorio y analizados posteriormente, se podría hacer un modelo para estimar el peso, con bastante error, pero se podría hacer. El problema llega cuando otro día volvías al laboratorio y hacías los mismos ensayos con los mismos pesos. En teoría, tendrían que dar más o menos lo mismo, pero la realidad es que al volver a hacerlos, salían valores muy distintos y no seguían el patrón anterior. El problema está en que el SMA es muy sensible a la temperatura a la que está sometida. La temperatura del laboratorio era distinta cada día, con lo que los valores variaban bastante y no se podría hacer ningún modelo.
- La causa principal de la no linealidad de los valores obtenidos también tiene que ver con la temperatura a la que está el laboratorio. El SMA es muy sensible a la temperatura, hasta tal punto, que cuando se abría la puerta del laboratorio, la simulación que se estaba haciendo no era válida debido a la corriente de aire que generaba la acción de abrir la puerta.
- Otro problema era el tránsito de gente en el laboratorio. Cuando pasaban al lado del banco ocurría igual que antes, el ensayo saldría erróneo y no valdría.
- La desviación estándar que se calcula es demasiado grande y viene generada por todo lo anterior.

Para poder solucionar estos problemas y poder hacer un modelo mejor de nuestro sistema, se pensaron varias cosas:

- Realizar los ensayos al mediodía, que era cuando el tránsito de gente era menor.
- En el modelo programado en el Script, se eliminarán las tres simulaciones que han salido peor, con lo que solo analizaremos 12 de todas ellas. Esto se realizará de un modo sencillo: como lo que nos dice el error y más o menos la linealidad que tienen nuestros datos es la desviación estándar, el vector que contiene esos datos se ordenará de menor a mayor y los últimos 3 valores serán eliminados.
- Como el problema principal es la temperatura a la que está sometida el SMA, se pensó en “aislar” el banco de pruebas. Como no se tenían materiales necesarios para poder mantener el banco a una temperatura constante y controlada, se puso una caja de cartón para cubrirlo entero y así trabajar a una temperatura casi constante (véase figura 37). En realidad, la temperatura no era constante todo el tiempo pero con la caja de cartón evitaríamos que las corrientes de aire afectasen al hilo y los datos que se obtuviesen en los ensayos

sean mucho más constantes que antes. Se debe recordar que el SMA no es lineal, posee histéresis, pero de esta forma los datos obtenidos serán mucho mejores.



Figura 37: Caja de cartón “aislando” el banco de pruebas.

Para que se vea cómo afecta la temperatura a los ensayos, se presentará un ensayo variando la temperatura a propósito y otro normal. Se variará la temperatura soplando unas cuantas veces al hilo mientras se está haciendo el ensayo.

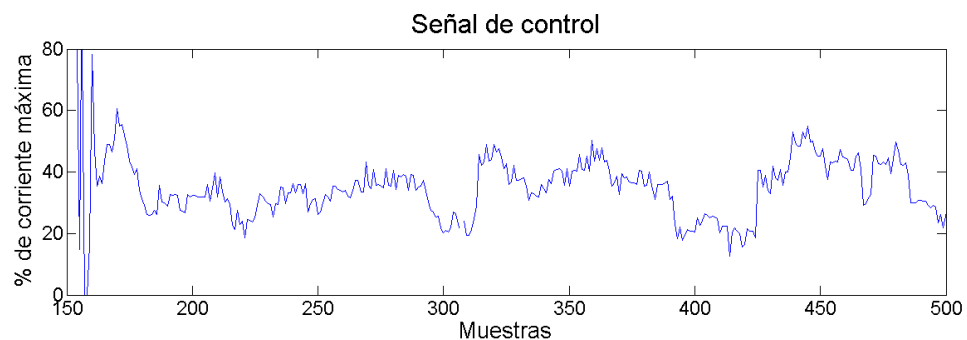


Figura 38: Señal de control (filtrada) variando la temperatura.

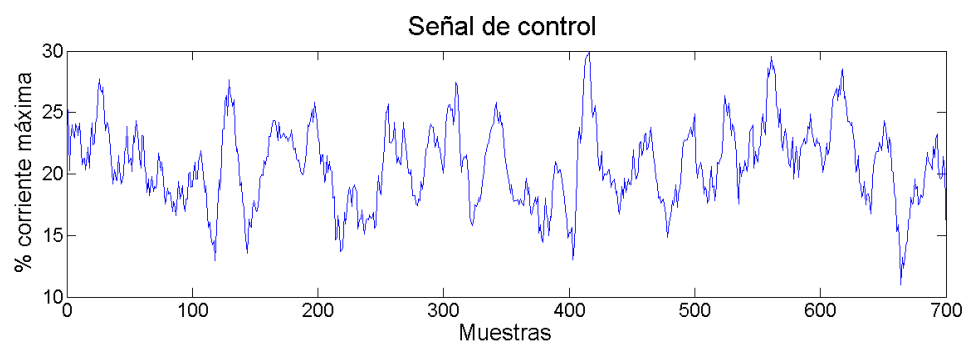


Figura 39: Señal de control (filtrada) SIN variar la temperatura.



Se puede observar los picos que tiene la señal en la que se ha variado la temperatura soplando unas cuantas veces y como en la otra señal no aparecen esas variaciones.

Con todo esto se quiere decir que los ensayos definitivos se harán al mediodía, con una caja de cartón y quitando las tres simulaciones que han salido peor. El objetivo de esto es que la desviación estándar sea reducida y los datos obtenidos sean más constantes.

6.3 Ensayos definitivos

En este apartado se entrará más en detalle en los ensayos realizados, tanto para la señal de control como para la de posición. Se tendrá en cuenta todo lo contado en los apartados anteriores para poder realizar los ensayos de una manera mejor.

De acuerdo a los problemas encontrados y a sus soluciones descritas, el modelo final del Script será de la siguiente manera:

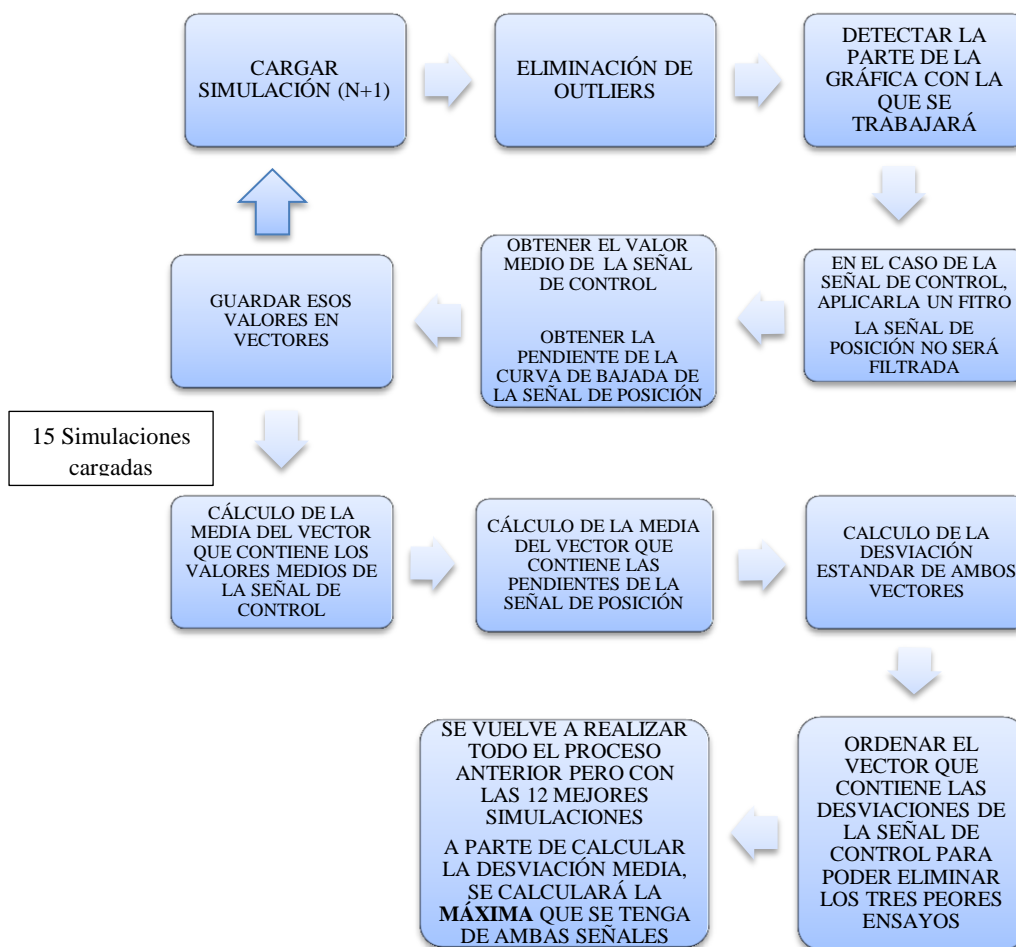


Figura 40: Modelo definitivo desarrollado en el Script.

A partir de ahora este será el modelo a seguir con todas las soluciones propuestas. En el siguiente apartado se verán los ensayos definitivos.

6.3.1 Ensayo a referencia fija

Como ya se ha mencionado antes, el ensayo se ha realizado al mediodía y con una caja de cartón “aislando” el banco de pruebas. Para intentar modelar el sistema se han realizado varios ensayos con una diferencia de peso de 30 gramos. En concreto se han realizado de 200 gramos, 230 gramos, 260 gramos, 300 gramos y 330 gramos.

Cabe destacar que en todos los ensayos realizados se ha considerado una temperatura constante e igual a 24°C. Si la temperatura fuese otra distinta, los datos de los ensayos serían totalmente distintos.

- **Ensayo 200 gramos**

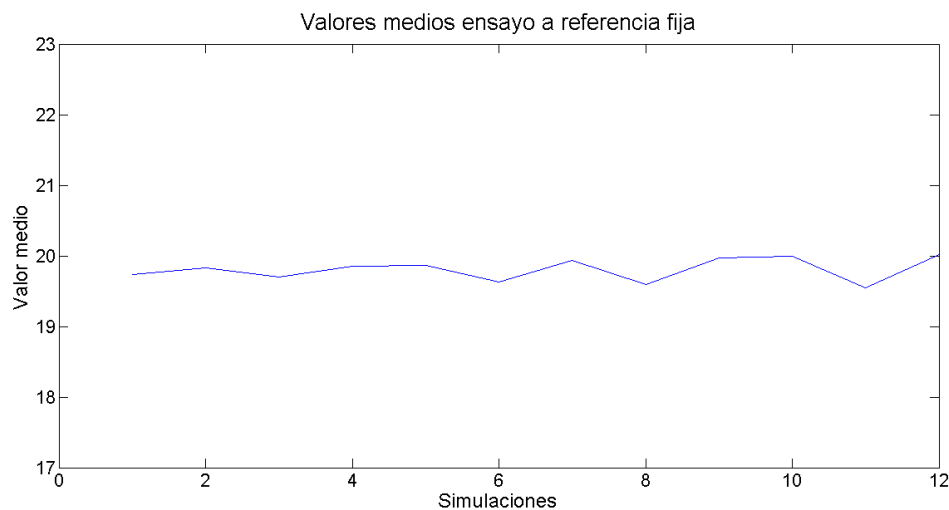


Figura 41: Valores medios de la señal de control de las 12 simulaciones para 200 gramos

En la figura 41 podemos observar que los valores obtenidos son mucho más lineales que los ensayos preliminares debido a los cambios que se han comentado anteriormente. Los datos importantes que se obtendrán de este ensayo son los siguientes:

$$\text{Valor medio total} = 19.8066$$

$$\text{Valor desviación estándar} = 0.1629$$

$$\text{Valor máximo de la desviación} = 0.2559$$

• Ensayo 230 gramos

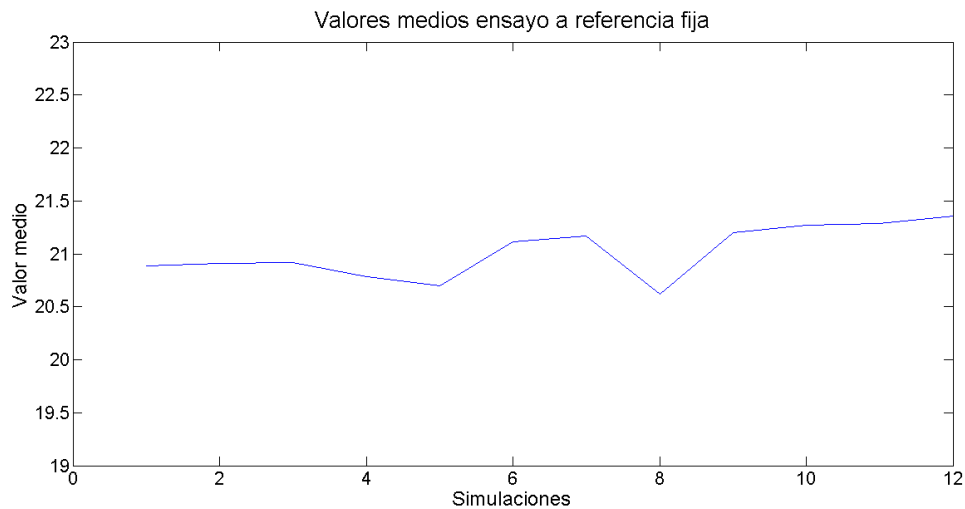


Figura 42: Valores medios de la señal de control de las 12 simulaciones para 230 gramos.

En la figura 42, también se puede apreciar que son datos bastante lineales. Los datos importantes de este ensayo son los siguientes:

Valor medio total = 21.0176

Valor desviación estándar = 0.2468

Valor desviación máxima = 0.4008

Para los demás ensayos se procedió de forma idéntica pero aumentando el peso en 30 gramos. A continuación se mostrará una tabla con todos los resultados finales del ensayo a referencia fija.

Tabla 7: Resultados finales para el ensayo a referencia fija.

Temperatura=24°C		200g	230g	260g	300g	330g	
Referencia	6000	Valor medio	19.806	21.017	22.251	23.257	23.693
		Desviación MAX	0.255	0.400	0.402	0.270	0.412
		Desviación media	0.162	0.246	0.209	0.174	0.253
Desplazamiento(mm)		2,928					

Se puede observar que la desviación que se tiene en las simulaciones de los distintos pesos es bastante pequeña con lo que el error también lo será. Se entrará en más detalle en el capítulo de conclusiones.

6.3.2 Ensayo de relajación

Para este tipo de ensayo se ha procedido de igual manera que con el ensayo de la señal de control, aumentando el peso en 30 gramos y en las mismas condiciones.

Cabe destacar que en todos los ensayos realizados se ha considerado una temperatura constante igual a 24°C. Si la temperatura fuera otra distinta, los datos de los ensayos serían totalmente distintos.

- **Ensayo 200 gramos**

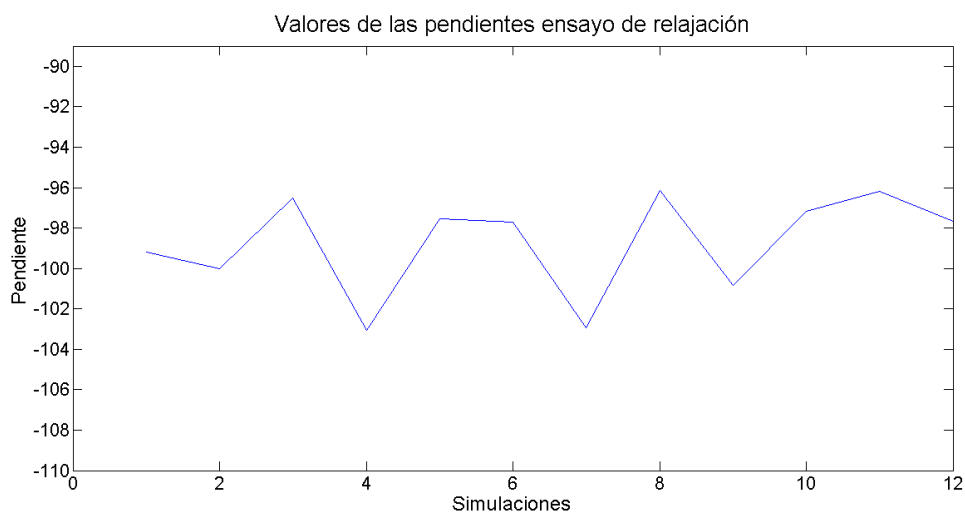


Figura 43: Valores de las pendientes de la señal de posición de las 12 simulaciones para 200 gramos.

Como se puede observar en la figura 43 los valores de las pendientes no son iguales de constantes que los valores de la señal de control. Los valores de las pendientes son negativos debido a que estamos analizando la curva de enfriamiento del SMA cuya pendiente es negativa (Véase figura 34). Los datos importantes que se obtienen de este ensayo son los siguientes:

Valor de la pendiente media = -98.7438

Valor de la desviación estándar = 2.4690

Valor máximo de la desviación = 4.3062

• Ensayo 230 gramos

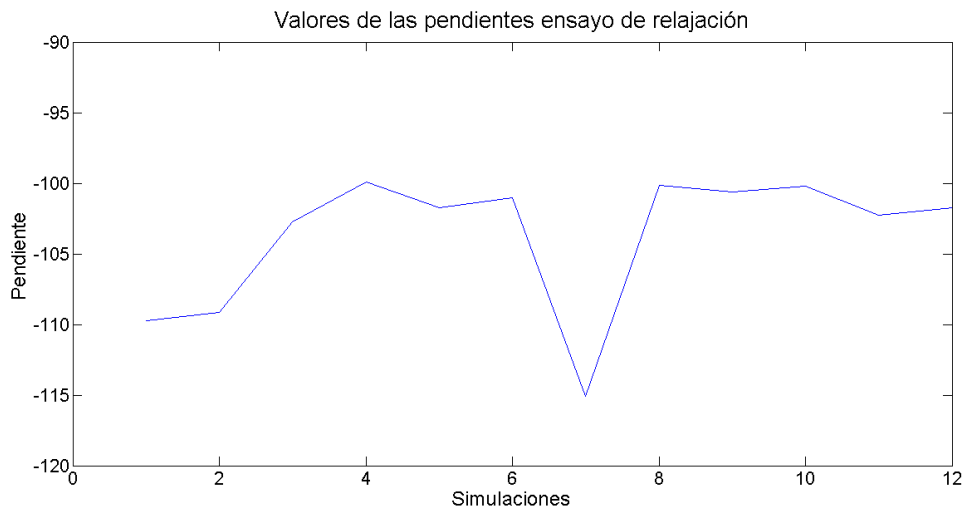


Figura 44: Valores de las pendientes de la señal de posición de las 12 simulaciones para 230 gramos.

Los datos importantes de este ensayo son los siguientes:

Valor medio de la pendiente media = -103.7042

Valor de la desviación estándar = 4.8815

Valor máximo de la desviación = 11.3708

Al igual que en los ensayos para la señal de control, aquí también se ha procedido de forma idéntica para los ensayos restantes, aumentando el peso en 30 gramos y en las mismas condiciones. A continuación se mostrará una tabla con todos los resultados obtenidos.

Tabla 8: Resultados finales para el ensayo de relajación

Temperatura=24°C		200g	230g	260g	300g	330g	
Referencia	6000	Pendiente	-98.743	-103.704	-109.43	-114.516	-124.412
Desplazamiento(mm)	2,928	Desviación MAX	4.306	11.370	3.164	6.533	20.262
		Desviación media	2.469	4.881	2.193	3.069	8.823

Como bien se había pensado desde un principio, a medida que se aumenta el peso la pendiente es mayor debido a que hay mayor carga tirando del hilo, pero se puede observar que la desviación máxima en algunas simulaciones se dispara. Se entrará en más detalles en el siguiente capítulo.



Capítulo 7

7. RESULTADOS

Este capítulo es uno de los más importantes de todo el proyecto, ya que se darán a conocer los resultados finales de los dos tipos de ensayos. Se valorará todo lo realizado, comentando si es posible la estimación de carga y se dirá el error que se estará cometiendo.

7.1 Ensayo a referencia fija

Para mostrar el resultado final de este ensayo se mostrará una gráfica para que se pueda ver y explicar mejor.

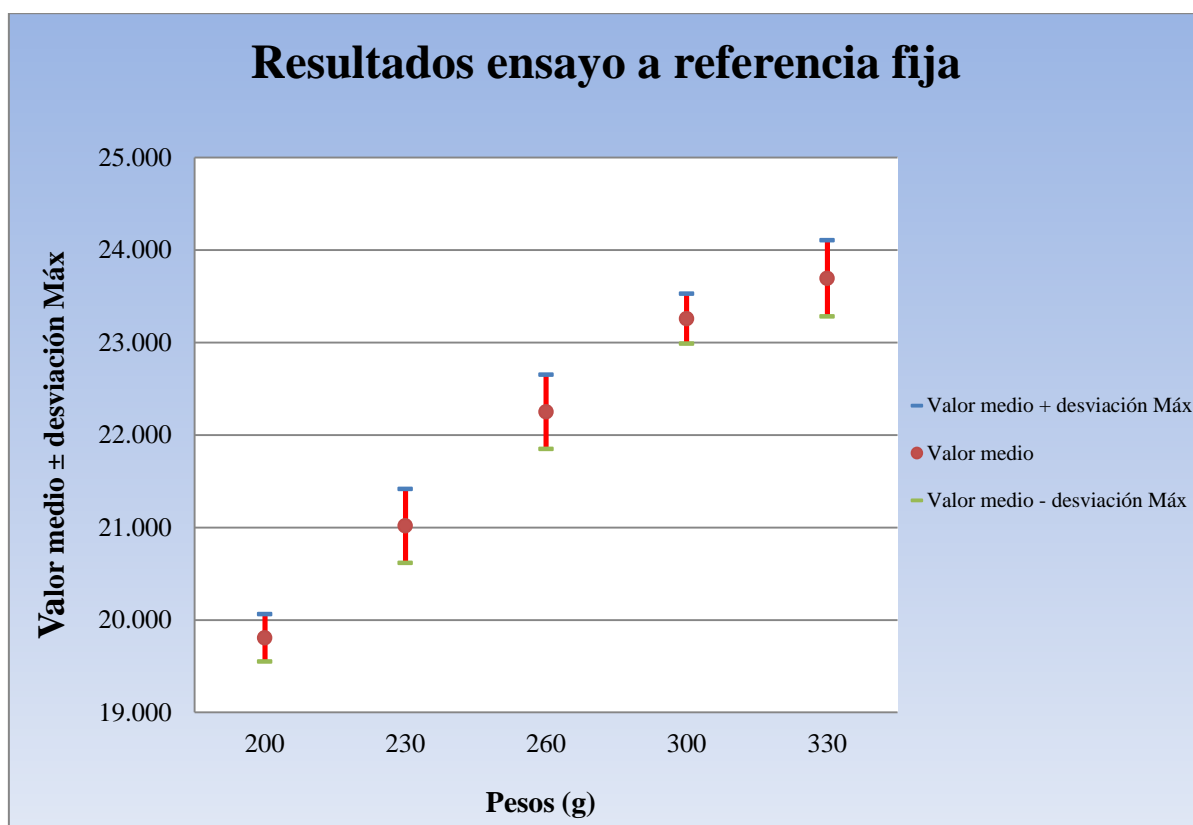


Figura 45: Grafica de resultados del ensayo a referencia fija.

En la gráfica se muestran los resultados del primer tipo de ensayo, ensayo a referencia fija. Se puede ver los intervalos a los que pertenecen cada peso. Esos intervalos vienen determinados por el valor medio de cada ensayo (valor medio de 200 gramos, valor medio de 230 gramos, etc.) \pm la desviación máxima. En un principio se pensó en poner la desviación media de cada ensayo, pero a la hora de verificar el peso aparecerían problemas. Se escogió la desviación máxima para estar más seguros de poder estimar la carga y que nuestro porcentaje de acierto sea mayor, ya que siempre va a haber alguna simulación que salga peor y tenga una desviación estándar mayor que las demás. En definitiva, se pone la desviación máxima, para estar en el caso más desfavorable.

En la gráfica se puede observar varias cosas:

- Los intervalos definidos de 200 a 260 gramos se pueden diferenciar claramente, ya que no se solapan entre ellos. Esto significa que en ese intervalo se puede diferenciar 30 gramos con una buena precisión.
- A medida que se aumenta el peso, el espacio que hay entre los intervalos definidos va disminuyendo notablemente, hasta tal punto que a partir de 300 gramos aparecerá un solape considerable. Esto quiere decir que a partir de dicho peso el error será notable, con lo que el porcentaje de acierto será reducido. En la figura 46 se puede observar lo dicho anteriormente de una manera más clara, es decir, $A > B > C$. A partir de los 300 gramos aparece solapamiento, que está indicada con la zona rayada.

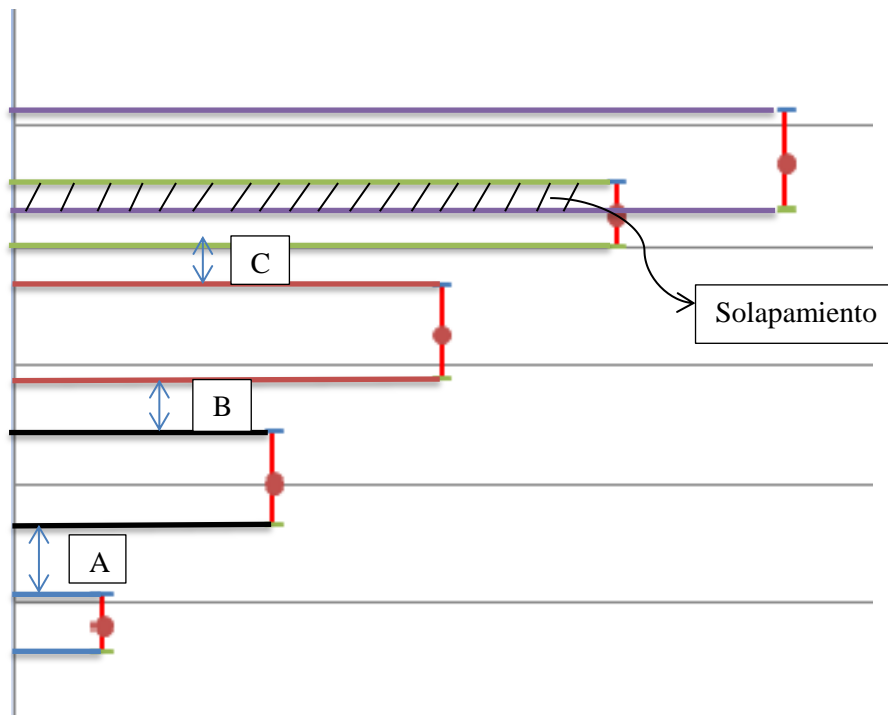


Figura 46: Zoom de la gráfica de resultados del ensayo de referencia fija.

A continuación se estudiará los dos últimos intervalos de la gráfica, que es donde hay solapamiento. Se procederá a calcular el error.

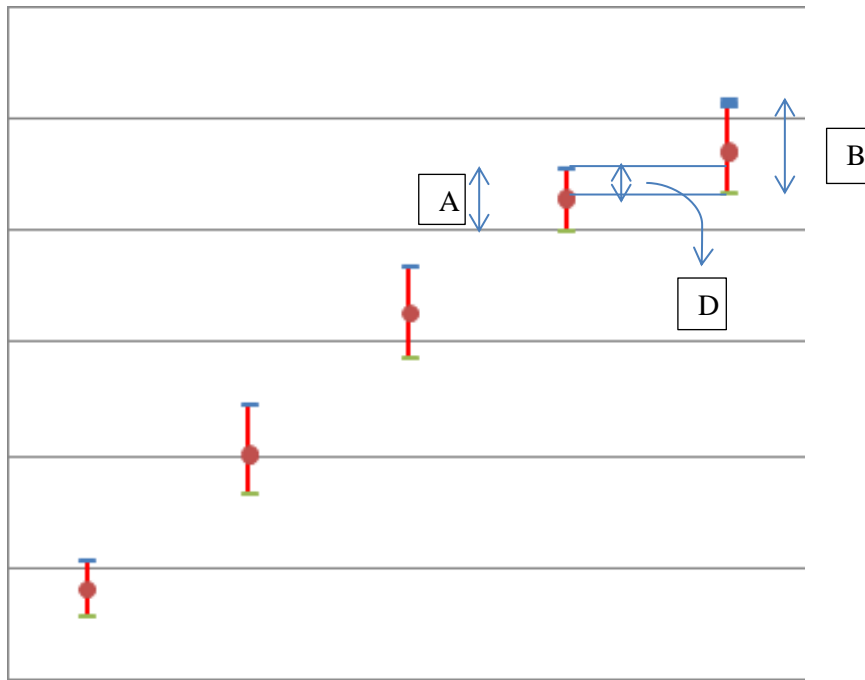


Figura 47: Zoom de la gráfica de resultados del ensayo a referencia fija.

En concreto se van a calcular dos tipos de errores:

1. Primer porcentaje de error:

$$B = (23.693 + 0.412) - (23.257 - 0.270) = 0.824$$

$$D = (23.257 + 0.270) - (23.693 - 0.412) = 0.246$$

$$\% \text{ error} = \frac{D}{B} \cdot 100 = 29.85\%$$

Es decir, cuando se quiere estimar un peso de 300 gramos, hay un **29.85%** de probabilidad de que la carga estimada sea 330 gramos.

2. Segundo porcentaje de error:

$$A = (23.257 + 0.270) - (23.257 - 0.270) = 0.54$$

$$D = (23.257 + 0.270) - (23.693 - 0.412) = 0.246$$

$$\% \text{ error} = \frac{D}{A} \cdot 100 = 45.55\%$$

Es decir, cuando se quiere estimar un peso de 330 gramos, hay un **45.55%** de probabilidades de que la carga estimada sea 300 gramos.

En la figura 48 se ha representado la desviación máxima frente a los pesos para que se pueda ver que la desviación máxima que hay en este tipo de ensayo ha sido más o menos constante en todos los pesos. Esto quiere decir que las simulaciones hechas han salido bastante bien y se podrá decir que ha sido un buen ensayo.

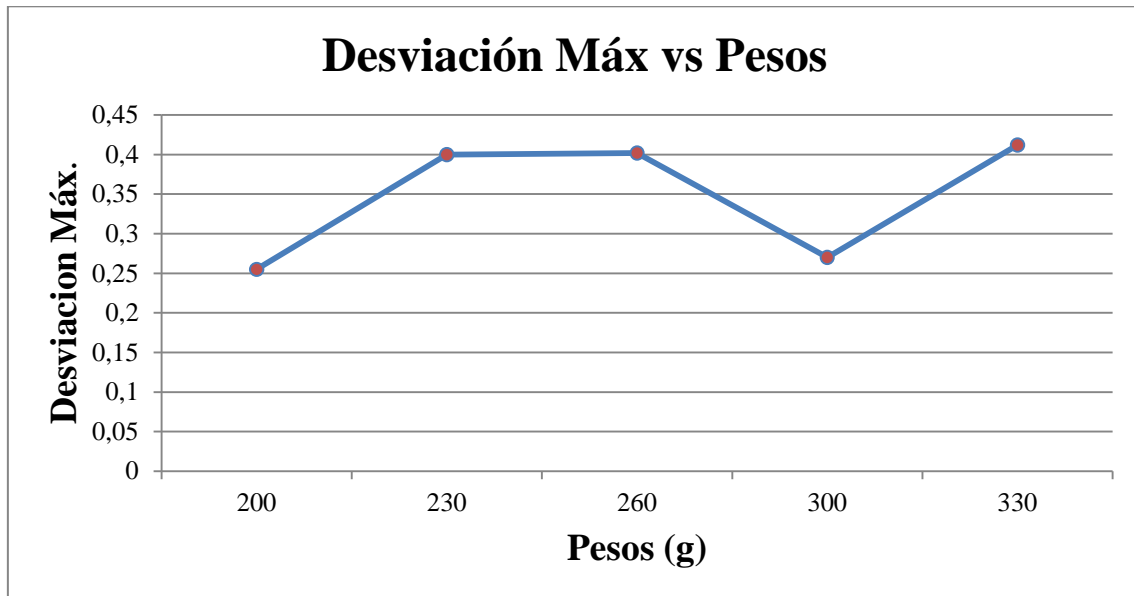


Figura 48: Representación gráfica de la desviación máxima frente a los pesos del ensayo a referencia fija.

En la figura 49 se ha representado los valores medios de la señal de control frente a los pesos. En esta gráfica se puede observar que es lineal hasta el peso de 260 gramos, que es donde empieza a haber solapamiento, como se ha visto anteriormente. Como está indicada en la gráfica, en el intervalo de 200-260 gramos, habrá un 100 % de aciertos a la hora de estimar el peso con una resolución de 30 gramos.

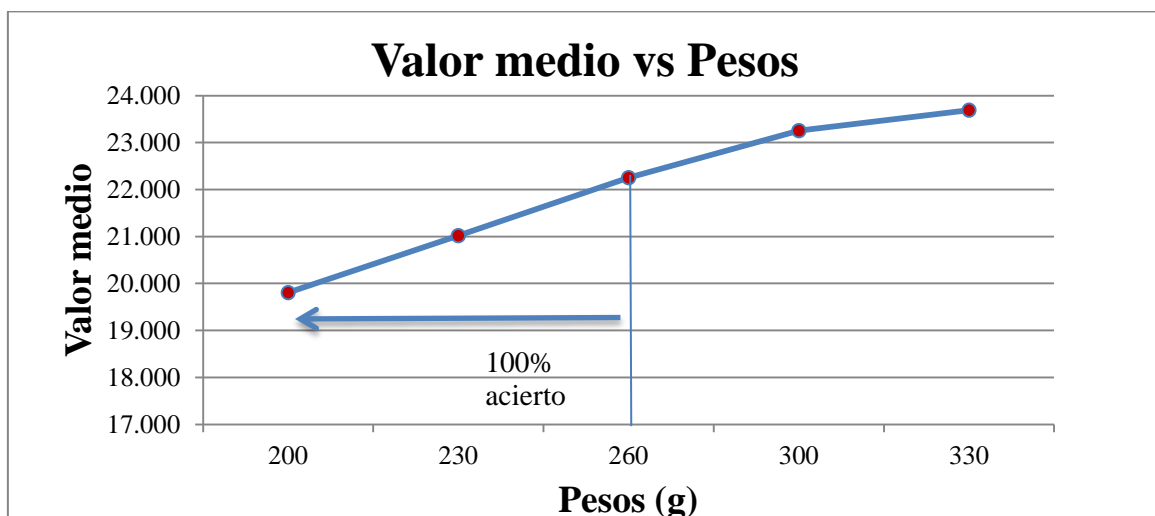


Figura 49: Representación gráfica de los valores medios frente a los pesos del ensayo a referencia fija.



Como se ha mencionado anteriormente, se ha desarrollado otro Script para la verificación, es decir, para ver si verdaderamente podemos estimar la carga de acuerdo a los resultados obtenidos. En el Script se van a analizar 5 simulaciones. Cabe destacar que con estas 5 simulaciones no se ha desarrollado el programa de modelación, solo se han utilizado para la verificación. Se hicieron el mismo día (para asegurarse de que estuviesen a la misma temperatura) pero se guardaron para analizarlas al final y poder verificar si se puede estimar la carga.

De las 5 simulaciones se obtendrá el valor medio total. Posteriormente, se comprobará que ese valor medio que obtenemos, se encuentra en algún intervalo de los definidos en la gráfica de la figura 45.

Obviamente, solo se puede estimar la carga con un 100% de acierto en el intervalo de 200-260 gramos con una resolución de 30 gramos y, efectivamente, mediante el Script desarrollado para verificar, se ha comprobado que se puede tener esa resolución en dicho intervalo. También se ha comprobado que a partir de 260 gramos, el error es mayor al 10 %.

7.2 Ensayo de relajación

Para mostrar los resultados de este ensayo, también se presentará una gráfica para que se pueda ver y explicar mejor. Los valores numéricos de las pendientes están puestos en valor absoluto.

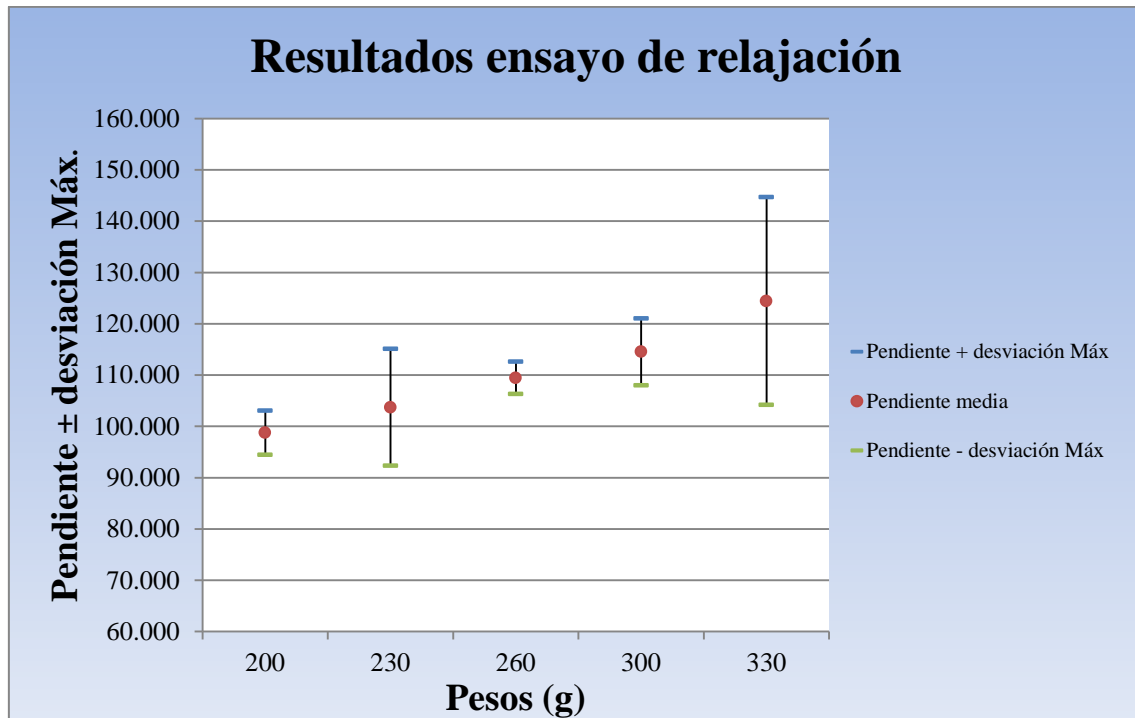


Figura 50: Gráfica de resultados de la señal de Posición.

En la gráfica se muestra los resultados obtenidos en el segundo tipo de ensayo, el ensayo de relajación. Están representados los intervalos que pertenecen a cada peso, y esos intervalos vienen determinados por la pendiente media \pm la desviación máxima. También se pone la desviación máxima para estar en el peor de los casos.

Como se puede observar hay solapamiento entre todos los intervalos por lo que este ensayo no valdrá, ya que se tendrán errores en todos los intervalos y no sería viable la estimación de la carga. Esto puede ser propiciado por todo lo que se ha comentado en el apartado de *problemas experimentales*. Las soluciones que se propusieron no valen para este tipo de ensayo ya que según los resultados es imposible que no haya error.

A continuación se puede ver en la gráfica de la figura 51 la representación de los valores de la desviación máxima frente a los distintos pesos. Se ve claramente que dicha desviación varía bastante para los diferentes pesos. Esto quiere decir que las simulaciones hechas para este tipo de ensayo no han salido muy bien con lo que no podemos decir que se han realizado ensayos buenos, sino todo lo contrario.

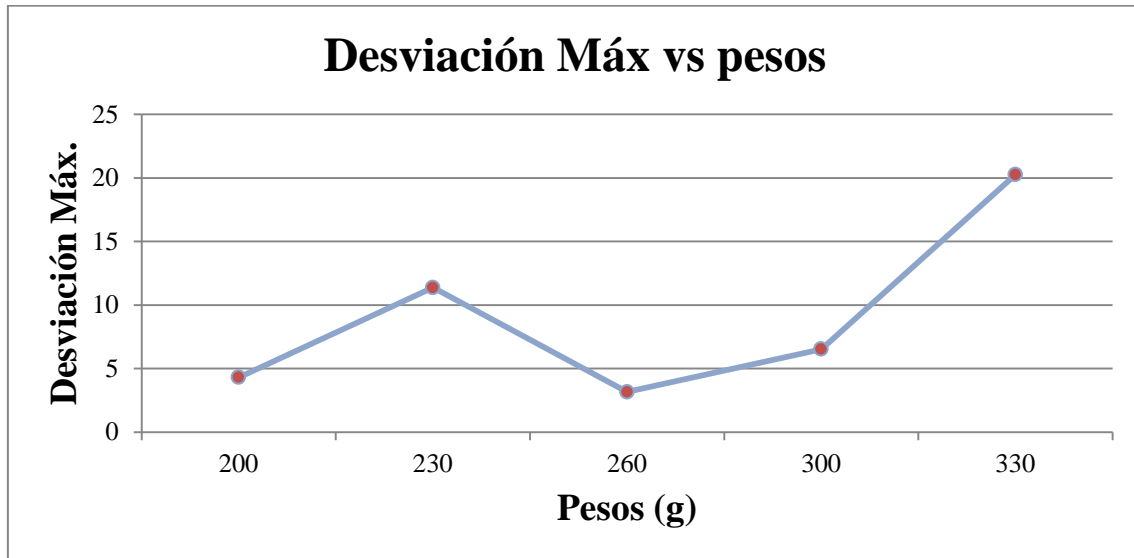


Figura 51: Representación gráfica de la desviación máxima frente a los pesos del ensayo de relajación.

En definitiva, lo que se pensó en un principio de que la pendiente tendría que ir aumentando a medida que se aumenta el peso es cierto, pero la desviación máxima calculada es bastante grande y apenas es constante, por eso, los intervalos de cada peso se solapan entre ellos.



Capítulo 8

8. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Este capítulo junto al capítulo 7 son los más importantes de este proyecto. Aquí se dirán las conclusiones pertinentes en función de los resultados obtenidos. También se dirán los futuros trabajos que pueden realizarse para la estimación de peso mediante este tipo de material utilizado, el hilo de Nitinol.

8.1 Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos y del análisis realizado en los dos tipos de ensayos, se dirán las conclusiones obtenidas.

La primera conclusión es decir cuál de los dos tipos de ensayos es más viable para la estimación del peso. En este caso parece obvio. Fijándonos en los resultados del capítulo 7, el ensayo de relajación queda totalmente descartado ya que como bien muestra la figura 48 existe solapamiento en todos los intervalos equivalentes a cada peso, con lo que si se quiere estimar el peso, se cometerán errores muy grandes y la resolución que se obtenga será muy mala. A parte, en la gráfica de la figura 51 se muestra que los ensayos no han sido buenos debido a la gran variación que hay en los valores de la desviación máxima. Con esto no se quiere decir que ya no se pueda estudiar este tipo de ensayo en un futuro, pero habría que hacer algunas modificaciones, ya sea en el método del estudio realizado o en el entorno que rodea al banco de pruebas, sobre todo para que el valor de las desviaciones máximas sea más pequeña y más constante en todas las simulaciones. Algunas modificaciones podrían ser mejorar la electrónica que lleva incorporada el banco de pruebas o intentar que las condiciones del laboratorio sean más favorables.

La segunda conclusión obtenida, y la más importante, es que el mejor ensayo para la estimación del peso es el **ensayo a referencia fija**. Los puntos a destacar son los siguientes:

- Se ha validado que no hace falta ningún tipo de sensor para medir carga en SMA con una resolución de 30 gramos.
- Se ha conseguido errores menores al 10 % en cargas menores de 260 gramos y para cargas mayores no se ha conseguido. No obstante, en el intervalo de 200 a 260 gramos de la gráfica 46 se puede concluir que no hay solape y que no se ha llegado a la resolución máxima del SMA.
- La temperatura a la que está sometida el SMA es muy importante y ha provocado muchos errores. Hay que tenerla mucho más en cuenta de lo que se ha tenido. Si la temperatura fuese siempre la misma, es decir, constante, los ensayos saldrían mucho mejor y se podría ser más exactos en el modelo desarrollado. Con la caja de cartón se mejoró algo el tema de la temperatura pero claramente la temperatura no se mantiene constante todo el tiempo.

Como última conclusión, destacar que si se intenta estimar la carga haciendo los ensayos a una temperatura distinta a la de este proyecto (24°C) , se deberá modelar otra vez todo el sistema a la temperatura deseada, ya que los valores obtenidos en este proyecto son **solo** para una temperatura de 24°C.



8.2 Futuros trabajos

La realización de este proyecto ha abierto otros caminos para poder investigar la capacidad que pueden tener los SMAs de estimar carga. Algunas propuestas para futuros proyectos son las siguientes:

- Repetir los ensayos a distintas referencias (contracciones). Si en este proyecto el SMA trabajaba a un 2%, llevarla por encima o por debajo de ese porcentaje.
- Comprobar el modelo desarrollado con cargas mayores y menores a los utilizados en este proyecto, es decir, ver si para pesos menores a 200 gramos podríamos estimar cargas con una resolución de 30 gramos y con un 100% de acierto, y que para pesos mayores a 260 gramos seguirá habiendo errores mayores al 10%.
- Conseguir llegar a la resolución máxima del SMA en pesos menores a 260 gramos.
- Mejorar las condiciones del laboratorio en cuanto a la temperatura a la que está sometida el hilo, sobre todo intentar tener una temperatura constante en el hilo, y repetir todos los procesos mencionados para la estimación de carga.
- Repetir el ensayo de relajación en condiciones mejores (temperatura, electrónica).
- Mejorar los algoritmos desarrollados para el tratamiento de datos de las señales.



APÉNDICE A: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CORTEX M3 STM32F103

- Harvard Architecture, 512 KB ROM (144 MB/s bandwidth), 64 KB RAM (72 MB/s bandwidth).
- 72 Mhz 32 Bit ARM Cortex-M3 CPU, 4 Stage Pipeline.
- 21 analog inputs, default range 0 - 3,3V 12 bits resolution, 1 megasample/second; the analog input range can be changed to measure smaller amplitude analog inputs.
- 2 analog outputs range 0 - 3,3V 12 bits resolution.
- Integrated temperature sensor.
- 12 Direct Memory Access (DMA) channels.
- Up to 112 digital input/output (STM32F103ZE), 50 Mhz toggle speed.
- 11 timers, 2 of them capable of implement the driver signal for develop a 3-phase brushless. DC motor driver, 16 PWM outputs, each timer supports quadrature encoder signal reading.
- SysTick Timer needed to use embedded Real-Time Operating System Kernels.
- Communication Interfaces: 2xI2C, 3xSPI, 2xI2S, 1xCAN Bus 2.0B, 1xUSB 2.0 Full Speed, SDIO (SD Card reader), and 5Xusart.
- Power Consumption 120mW at 72 MHz with all peripherals enabled, 1.6 mW/MHz, using a +3,3V operation.
- Extremely low cost microcontroller.



APÉNDICE B: CARACTERÍSTICAS HILO DE NITINOL

Tabla 9 (APENDICE B): Características principales del Nitinol.

Diameter Size inches (mm)	Resistance ohms/inch (ohms/meter)	Pull Force pounds (grams)	Approximate Current for 1 Second Contraction (mA)	Cooling Time 158° F, 70°C "LT" Wire (seconds)	Cooling Time 194° F, 90°C "HT" Wire (seconds)
0.001 (0.025)	36.2 (1425)	0.02 (8.9)	45	0.18	0.15
0.0015 (0.038)	22.6 (890)	0.04 (20)	55	0.24	0.20
0.002 (0.050)	12.7 (500)	0.08 (36)	85	0.4	0.3
0.003 (0.076)	5.9 (232)	0.18 (80)	150	0.8	0.7
0.004 (0.10)	3.2 (126)	0.31 (143)	200	1.1	0.9
0.005 (0.13)	1.9 (75)	0.49 (223)	320	1.6	1.4
0.006 (0.15)	1.4 (55)	0.71 (321)	410	2.0	1.7
0.008 (0.20)	0.74 (29)	1.26 (570)	660	3.2	2.7
0.010 (0.25)	0.47 (18.5)	1.96 (891)	1050	5.4	4.5
0.012 (0.31)	0.31 (12.2)	2.83 (1280)	1500	8.1	6.8
0.015 (0.38)	0.21 (8.3)	4.42 (2250)	2250	10.5	8.8
0.020 (0.51)	0.11 (4.3)	7.85 (3560)	4000	16.8	14.0



APÉNDICE C: SCRIPT DE MATLAB (MODELACIÓN)

```
%Ensayos. 15 SIMULACIONES.

fprintf('##### \n\n');

%Creo vectores donde se guardaran los datos obtenidos en todas las
%simulaciones
VALOR_MEDIO=zeros(15,1);
VALOR_MEDIO_1=zeros(12,1);
VALOR_DESVIACION=zeros(15,1);
VALOR_DESVIACION_1=zeros(12,1);
VALOR_RMS=zeros(15,1);
VALOR_RMS_1=zeros(12,1);
PENDIENTE=zeros(15,1);
PENDIENTE_1=zeros(12,1);
MEDIA_POS=zeros(12,1);
VALOR_DESVIACION_PENDIENTES=zeros(12,1);
quitar_valores=3;

for k=1:1:15,

%Cargamos todas las simulaciones a la vez.
load(['Simul_',num2str(k),'.mat']);

%Acotar la señal de la Posición, es decir, solo cogemos la curva de bajada
%que aparece cuando desconectamos el control de la SMA, para posteriormente
%trabajarla y calcular la pendiente que tiene en función de los pesos
%utilizados.
%A su vez eliminamos los outliers que puedan aparecer en ambas señales.
d=median(POS_2)+50;
fi=find(POS_2>=d);
indices_a_quitar=(fi);
POS_2(indices_a_quitar)=[];
CONTROL_2(indices_a_quitar)=[];

%Detectamos la rampa de bajada, es decir, cuando la SMA se está enfriando
ww=find(REF_2<6000,1);
pos_bajada=POS_2(ww:(ww+40));
pos_bajada=double(pos_bajada);

%Detectamos la rampa de subida, es decir, cuando accionamos el control.
w=find(POS_2>0,1);
x=CONTROL_2((w+120):(w+120)+700);
dl=mean(x);

%Filtramos la señal de control y la señal de la posición de la SMA.
Z=smooth(x,11);

%Valor medio de la señal de control suavizada.
Valor_m=mean(Z);
fprintf('Valor medio %d = %2.4f \n',k,Valor_m);
```



```
VALOR_MEDIO(k,1)=Valor_m;

%Valor de la pendiente de bajada cuando desactivamos el control del
banco.
pendi=diff(pos_bajada);
pendiente_media=mean(pendi);
fprintf('Pendiente %d = %2.4f \n',k,pendiente_media);
PENDIENTE(k,1)=pendiente_media;

%Valor eficaz de la señal de control suavizada
RMS= sqrt((mean(Z.^2)));
fprintf('Valor RMS    %d = %2.4f \n\n',k,RMS);
VALOR_RMS(k,1)=RMS;
end

fprintf('##### \n\n');

%Imprimo los valores medios, eficaces y las pendientes de la simulación
t1=mean(VALOR_MEDIO);
t2=mean(VALOR_RMS);
Pendiente=mean(PENDIENTE);
fprintf('VALOR MEDIO TOTAL = %2.4f \n\n',t1);
fprintf('VALOR EFICAZ TOTAL= %2.4f \n\n',t2);
fprintf('VALOR DE LA PENDIENTE= %2.4f \n\n',Pendiente);
fprintf('##### \n\n');

%Calculo la desviación que hay de todas las simulaciones respecto a la
MEDIA TOTAL.

for p=1:15

    m=abs(VALOR_MEDIO(p)- t1);
    fprintf('Valor medio %d= %2.4f \n',p,VALOR_MEDIO(p));
    fprintf('Desviación    %d= %2.4f \n\n',p,m);
    VALOR_DESVIACION(p,1)=m;
end

%Calculo el valor medio de la desviación de todas las simulaciones. Si
este valor es grande (muy distinto de 0), tendríamos una mayor
fluctuación de los datos con lo que los datos obtenidos no serían muy
buenos.
t3=mean(VALOR_DESVIACION);
t4=max(VALOR_DESVIACION);
fprintf('MEDIA DE LA DESVIACIÓN = %2.4f \n\n',t3);
fprintf('DESVIACIÓN MAXIMA      = %2.4f \n\n',t4);
fprintf('##### \n\n');

%Quito los tres ensayos que han salido peor. Para ello ordeno el vector
que contiene todos los valores medios de la desviación, y encuentro los
subíndices en los que la desviación es mayor para poder eliminar esos
ensayos.
[desv_ordenada,indice]=sort(VALOR_DESVIACION);
ensayos_a_quitar=indice(13:15);
fprintf('Ensayos a quitar--> Ensayo numero %d \n\n',ensayos_a_quitar);
vector_ensayos_buenos=indice(1:12);
ensayo_quitado1=ensayos_a_quitar(1);
ensayo_quitado2=ensayos_a_quitar(2);
ensayo_quitado3=ensayos_a_quitar(3);
```



```
fprintf('##### \n\n');
fprintf('##### \n\n');
fprintf('##### \n\n');
fprintf('          SIMULAMOS          \n\n');
fprintf('      QUITANDO LOS 3 PEORES ENSAYOS \n\n');
fprintf('##### \n\n');
fprintf('##### \n\n');
fprintf('##### \n\n\n');

%Vuelvo a realizar todas las simulaciones quitando los 3 ensayos peores.

for j=1:1:12

%Cargamos todas las simulaciones a la vez, excepto los 3 peores ensayos.
load(['Simul_',num2str(vector_ensayos_buenos(j)),'.mat']);

%Acotamos la señal de la Posición, es decir, solo cogemos la curva de
bajada que aparece cuando desconectamos el control de la SMA, para
posteriormente trabajarla y calcular la pendiente que tiene en función de
los pesos utilizados.
%Quitamos los outliers de la señal de posición y de control.
d=median(POS_2)+50;
fi=find(POS_2>=d);
indices_a_quitar=(fi);
POS_2(indices_a_quitar)=[];
CONTROL_2(indices_a_quitar)=[];

ww=find(REF_2<6000,1);
pos_bajada=POS_2(ww:(ww+40));
pos_bajada=double(pos_bajada);

%Detectamos la rampa de subida, es decir, cuando accionamos el control.
%También detectamos la rampa de bajada, es decir, cuando quitamos el
%control del banco. Sólo trabajamos con la parte media de la señal de
%CONTROL_2 SIN rampa de subida ni de bajada.
w=find(POS_2>0,1);
x=CONTROL_2((w+120):(w+120)+700);

%Filtramos la señal de control.
Z=smooth(x,11);

%Sacamos las gráficas de las señales con las que vamos a trabajar.
figure;
subplot(311),plot(x);
subplot(312),plot(Z);
subplot(313),plot(pos_bajada);

%Calculamos los datos que se estudiarán.

%Valor medio de la señal de control suavizada.
Valor_m=mean(Z);
fprintf('Valor medio %d = %2.4f \n',vector_ensayos_buenos(j),Valor_m);
VALOR_MEDIO_1(j,1)=Valor_m;
```



```
%Valor de la pendiente de bajada cuando desactivamos el control del
banco.
pendi=diff(pos_bajada);
pendiente_media_1=mean(pendi);
fprintf('pendiente %d = %2.4f
\n',vector_ensayos_buenos(j),pendiente_media_1);
PENDIENTE_1(j,1)=pendiente_media_1;

%Valor eficaz de la señal de control suavizada
RMS= sqrt((mean(Z.^2)));
fprintf('Valor RMS %d = %2.4f \n\n',vector_ensayos_buenos(j),RMS);
VALOR_RMS_1(j,1)=RMS;
end

fprintf('##### \n\n');

%Se calcula y se imprime los valores medios, las pendientes, la
desviación estándar y la varianza de las dos señales.
media=mean(VALOR_MEDIO_1);
RMS=mean(VALOR_RMS_1);
Pendiente=mean(PENDIENTE_1);
varianza_control= var(VALOR_MEDIO_1);
varianza_posicion= var(PENDIENTE_1);
desviacion_estandar_control=std(VALOR_MEDIO_1);
desviacion_estandar_posicion=std(PENDIENTE_1);

fprintf('##### SEÑAL DE CONTROL ##### \n\n');
fprintf('VALOR MEDIO TOTAL = %2.4f \n\n',media);
fprintf('VALOR EFICAZ TOTAL= %2.4f \n\n',RMS);
fprintf('VALOR DE LA VARIANZA= %2.4f \n\n',varianza_control);
fprintf('VALOR DE LA DESVIACION ESTANDAR= %2.4f
\n\n',desviacion_estandar_control);

fprintf('##### SEÑAL DE POSICION ##### \n\n');

fprintf('VALOR DE LA PENDIENTE= %2.4f \n\n',Pendiente);
fprintf('VALOR DE LA VARIANZA= %2.4f \n\n',varianza_posicion);
fprintf('VALOR DE LA DESVIACION ESTANDAR= %2.4f
\n\n',desviacion_estandar_posicion);

%Calculo la desviación que hay de todas las simulaciones respecto a la
%MEDIA TOTAL de manera manual de las dos señales.

fprintf('----- \n');
fprintf('----- \n\n');
for b=1:12
    m_1=abs(VALOR_MEDIO_1(b)- media);
    fprintf('Valor medio %d= %2.4f
\n',vector_ensayos_buenos(b),VALOR_MEDIO_1(b));
    fprintf('Desviación %d= %2.4f \n\n',vector_ensayos_buenos(b),m_1);
    VALOR_DESVIACION_1(b,1)=m_1;
end
fprintf('----- \n');
fprintf('----- \n\n');
```



```
for b=1:12
    m_1_1=abs(PENDIENTE_1(b)- Pendiente);
    fprintf('Valor medio de las pendientes %d= %2.4f\n',vector_ensayos_buenos(b),PENDIENTE_1(b));
    fprintf('Desviación de la pendiente %d= %2.4f\n\n',vector_ensayos_buenos(b),m_1_1);
    VALOR_DESVIACION_PENDIENTES(b,1)=m_1_1;
End

fprintf('----- \n');
fprintf('----- \n\n');

%Calculo el valor medio de la desviación de todas las simulaciones. Si
este valor es grande, (muy distinto de 0), tendríamos una mayor
fluctuación de los datos con lo que los datos obtenidos no serían muy
buenos.

fprintf('##### SEÑAL DE CONTROL ##### \n\n');
media_desviacion=mean(VALOR_DESVIACION_1);
desviacion_max=max(VALOR_DESVIACION_1);
fprintf('MEDIA DE LA DESVIACIÓN = %2.4f \n\n',media_desviacion);
fprintf('DESVIACIÓN MAXIMA = %2.4f \n\n',desviacion_max);

fprintf('##### SEÑAL DE POSICION ##### \n\n');
media_desviacion_pendiente=mean(VALOR_DESVIACION_PENDIENTES);
desviacion_max_pendiente=max(VALOR_DESVIACION_PENDIENTES);
fprintf('MEDIA DE LA DESVIACIÓN DE LAS PENDIENTES = %2.4f\n\n',media_desviacion_pendiente);
fprintf('DESVIACIÓN MAXIMA DE LAS PENDIENTES = %2.4f\n\n',desviacion_max_pendiente);

fprintf('##### \n\n');
```



APÉNDICE D: SCRIPT DE MATLAB (VERIFICACIÓN)

```
%Ensayos para verificar el peso

fprintf('##### \n\n');

%Creo vectores donde se guardaran los datos obtenidos en todas las
%simulaciones
VALOR_MEDIO=zeros(5,1);
VALOR_MEDIO_1=zeros(17,1);
VALOR_DESVIACION=zeros(5,1);
VALOR_DESVIACION_1=zeros(17,1);
VALOR_RMS=zeros(5,1);
VALOR_RMS_1=zeros(17,1);
PENDIENT=zeros(5,1);
PENDIENTE_1=zeros(17,1);

quitar_valores=3;

for k=1:1:5,

%Cargamos las 5 simulaciones a la vez.
load(['Simul_',num2str(k),'.mat']);

d=median(POS_2)+50;
fi=find(POS_2>=d);
indices_a_quitar=(fi);
POS_2(indices_a_quitar)=[];
CONTROL_2(indices_a_quitar)=[];

%Detectamos la rampa de subida, es decir, cuando accionamos el
control.
%También detectamos la rampa de bajada, es decir, cuando quitamos el
%control del banco. Solo trabajamos con la parte media de la señal de
%CONTROL_1 SIN rampa de subida ni de bajada.
ww=find(REF_2<6000,1);
pos=POS_2(ww:(ww+50));

w=find(POS_2>0,1);
x=CONTROL_2((w+120):(w+120)+700);
d1=mean(x);

%Filtramos la señal de control
Z=smooth(x,11);

%Se sacan todas las gráficas
subplot(311),plot(x);
subplot(312),plot(Z);
subplot(313),plot(pos);

%Se calculan todos los datos de interés.
```




```
%Valor medio de la señal de control suavizada.
Valor_m=mean(Z);
fprintf('Valor medio %d = %2.4f \n',k,Valor_m);
VALOR_MEDIO(k,1)=Valor_m;

%Valor de la pendiente de bajada cuando desactivamos el control del
banco
pendi=diff(pos);
pendiente_media=mean(pendi);
fprintf('pendiente %d = %2.4f \n',k,pendiente_media);
PENDIENT(k,1)=pendiente_media;

%Valor eficaz de la señal de control suavizada
RMS= sqrt((mean(Z.^2)));
fprintf('Valor RMS %d = %2.4f \n\n',k,RMS);
VALOR_RMS(k,1)=RMS;
end

fprintf('##### \n\n');

%Imprimo los valores medios y eficaces totales de la simulación
t1_verif=mean(VALOR_MEDIO);
t2_verif=mean(VALOR_RMS);
fprintf('VALOR MEDIO TOTAL = %2.4f \n\n',t1_verif);
fprintf('VALOR EFICAZ TOTAL= %2.4f \n\n',t2_verif);
fprintf('##### \n\n');

%Calculo la desviación que hay de todas las simulaciones respecto a la
%MEDIA TOTAL

for p=1:5

    m=abs(VALOR_MEDIO(p)- t1_verif);
    fprintf('Valor medio %d= %2.4f \n',p,VALOR_MEDIO(p));
    fprintf('Dsviación %d= %2.4f \n\n',p,m);
    VALOR_DESVIACION(p,1)=m;

end

%Calculo el valor medio de la desviación de todas las simulaciones. Si
este valor es grande (muy distinto de 0), tendríamos una mayor
fluctuación de los datos con lo que los datos obtenido no serían muy
%buenos.

t3_verif=mean(VALOR_DESVIACION);
t4_verif=max(VALOR_DESVIACION);
fprintf('MEDIA DE LA DESVIACIÓN = %2.4f \n\n',t3_verif);
fprintf('DESVIACIÓN MAXIMA = %2.4f \n\n',t4_verif);

fprintf('##### ');
fprintf('##### ');
fprintf('##### ');
fprintf('##### \n\n');
fprintf('----- ESTIMACIÓN ----- \n');
fprintf('----- DEL ----- \n');
fprintf('----- PESO ----- \n\n');
```



%Ahora se procede a comprobar los datos cogidos para la verificación del peso con los obtenidos en los ensayos de modelación. Comparamos si el valor medio está comprendido en un intervalo. Ese intervalo será el valor medio total + - la desviación máxima que se ha calculado en los ensayos para modelar.

%Procedemos a hacer los cálculos pertinentes para 200g,230g,etc..

```
menor_200g=(media_200g)-(desviacion_max_200g);  
mayor_200g=(media_200g)+(desviacion_max_200g);
```

```
menor_230g=(media_230g)-(desviacion_max_230g);  
mayor_230g=(media_230g)+(desviacion_max_230g);
```

```
menor_260g=(media_260g)-(desviacion_max_260g);  
mayor_260g=(media_260g)+(desviacion_max_260g);
```

```
menor_300g=(media_300g)-(desviacion_max_300g);  
mayor_300g=(media_300g)+(desviacion_max_300g);
```

```
if t1_verif>=menor_200g && t1_verif<=mayor_200g
```

```
    disp(' El peso es de 200 gramos')  
end
```

```
if t1_verif>=menor_230g && t1_verif<=mayor_230g
```

```
    disp(' El peso es de 230 gramos')  
end
```

```
if t1_verif>=menor_260g && t1_verif<=mayor_260g
```

```
    disp(' El peso es de 260 gramos')  
end
```

```
if t1_verif>=menor_300g && t1_verif<=mayor_300g
```

```
    disp(' El peso es de 300 gramos')  
end
```



BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. W. K OTSUKA, "SHAPE MEMORY MATERIALS," CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1999.
- [2] LANSING, "PROCEEDING OF ENGINEERING ASPECT OF SHAPE MEMORY ALLOYS," 1988.
- [3] D. HODGSON, "USING SHAPE MEMORY ALLOYS, SHAPE MEMORY APPLICATIONS," 1988.
- [4] PÁGINA WEB: [HTTP://NEWS.BBC.CO.UK/2/HI/HEALTH/755819.STM](http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/755819.stm). [ÚLTIMO ACCESO: ENERO 2013].
- [5] PÁGINA WEB: [HTTP://HERKULES.OULU.FI/ISBN9514252217/HTML/X317.HTML](http://herkules.oulu.fi/isbn9514252217/html/x317.html). [ÚLTIMO ACCESO: ENERO 2013].
- [6] PÁGINA WEB: [HTTP://WWW.ACTIMAT.ES/WEB/MEMORIADEFORMA.ASP](http://www.actimat.es/web/memoriadeforma.asp). [ÚLTIMO ACCESO: ENERO 2013].
- [7] A.MARTIN, «CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE SISTEMAS CON HISTÉRESIS DE TIPO BOUC-WEN,» MASTER TESIS, 2011.
- [8] V. C. GUERRERO, *INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS TERMOMECAÑICOS EN EL EFECTO DE DOBLE MEMORIA DE FORMA DEL NITINOL*, UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO: THESIS, 2009.
- [9] A. G. LOPEZ, "NITINOL, UN BIOMATERIAL CON MEMORIA DE FORMA," DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA, FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN, 2011.
- [10] S. DOMINGO, "APLICACIONES DE LA SUPERELASTICIDAD DEL NITI A LOS STENTS:CONSIDERACIONES TERMOMECAÑICAS," 2002.
- [11] D. R. CASTA, "EL USO DE PROTESIS DE NITINOL PARCIALMENTE CUBIERTO EN LA OBSTRUCCIÓN GASTRODUODENAL MALIGNA," 2006.
- [12] H. R.SOUL, "APLICACIONES DE LA SUPERELASTICIDAD EN ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA PARA CONTROL DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS," UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO, 2005.



[13] PÁGINA WEB:

[HTTP://DEPTS.WASHINGTON.EDU/MATSEED/MSE_RESOURCES/WEBPAGE/MEMORY%20METALS/APPLICATIONS_FOR_SHAPE_MEMORY_AL.HTM](http://depts.washington.edu/matseed/mse_resources/webpage/memORY%20METALS/APPLICATIONS_FOR_SHAPE_MEMORY_AL.HTM). [ÚLTIMO ACCESO: ENERO 2013].

[14] S. DE LA FLOR, "ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA," 2010.

[15] A. F. CABALLERO, "CORTEX M3/M4 BASED MICROCONTROLLERS AS REAL TIME CONTROL SYSTEM FOR SPAMUS PROJECT," UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, 2013.